



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.04.17.07-TDI

**ESTUDO NUMÉRICO DOS IMPACTOS DOS
AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E DE PROCESSOS DE
SUPERFÍCIE NO DESENVOLVIMENTO DE
TEMPESTADES SEVERAS EM REGIÕES URBANAS**

Angel Domínguez Chovert

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Saulo Ribeiro de Freitas, e Nilton Manuel Évora do Rosário, aprovada em 26 de abril de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44KK8N8>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.04.17.07-TDI

**ESTUDO NUMÉRICO DOS IMPACTOS DOS
AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E DE PROCESSOS DE
SUPERFÍCIE NO DESENVOLVIMENTO DE
TEMPESTADES SEVERAS EM REGIÕES URBANAS**

Angel Domínguez Chovert

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Saulo Ribeiro de Freitas, e Nilton Manuel Évora do Rosário, aprovada em 26 de abril de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44KK8N8>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Domínguez Chovert, Angel.

D713e Estudo numérico dos impactos dos aerossóis atmosféricos e de processos de superfície no desenvolvimento de tempestades severas em regiões urbanas / Angel Domínguez Chovert. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xlvi + 296 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.04.17.07-TD1)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. Saulo Ribeiro de Freitas, e Nilton Manuel Évora do Rosário.

1. Precipitação. 2. Aerossóis. 3. Superfície urbana. 4. CCATT-BRAMSJULES. 5. Parametrização de microfísica. I.Título.

CDU 551.577:551.588.74



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Pós Graduação
Meteorologia

ATA DE REUNIÃO

DEFESA FINAL DE TESE: ANGEL DOMÍNGUEZ CHOVERT - REGISTRO 135801/2016

BANCA: 089/2021

No dia 26 de abril, às 13h330 por videoconferência, o aluno mencionado acima defendeu seu trabalho final, intitulado : "**Estudo numérico dos impactos dos aerossóis atmosféricos e de processos de superfície no desenvolvimento de tempestades severas em regiões urbanas.**" (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O aluno foi **APROVADO** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Meteorologia.

A banca sugere incorporar as observações dos membros na dissertação.

Eu, Nelson Jesuz Ferreira, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Membros da Banca

Dr. Nelson Jesuz Ferreira - **Presidente** - INPE

Dr. Saulo Ribeiro de Freitas - **Orientador** -INPE

Dr. Nilton Manuel Évora do Rosário - **Orientador** - UNIFESP)

Dr. Claudio Moises Santos e Silva - **Membro da banca** (UFPeI)

Dr. Marcelo Félix Alonso - **Membro da banca** - (UFRN)- (PPGCC)



Documento assinado eletronicamente por **Nelson Jesuz ferreira (E)**, **Usuário Externo**, em 21/05/2021, às 11:04 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7194799** e o código CRC **E4B3D54B**.

"...que la enseñanza científica vaya, como la savia en los árboles, de la raíz al tope de la educación pública. Que la enseñanza elemental sea ya elementalmente científica: que en vez de la historia de Josué, se enseñe la formación de la Tierra".

JOSÉ MARTÍ
em "La América", 1883

*A meus pais **Carmen** e **Angel**, à minha irmã **Laura** e
a meus avós **Blanca**, **Nieves** e **Eloina**.*

AGRADECIMENTOS

A meus orientadores Dr. Saulo Ribeiro de Freitas e Dr. Nilton Manuel Évora do Rosário pela ajuda e o apoio que me brindaram durante todos estes anos. Pela paciência e dedicação que tiveram comigo mesmo que à distância. Pela quantidade de conhecimento transmitido, pelas ideias e sugestões que foram a luz nos momentos de desespero. Pela disponibilidade e por tudo que vivemos nestes neste período tão importante para minha carreira profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo e auxílio financeiro durante a realização do curso.

A minha família pelo apoio incondicional durante todos meus anos de estudo e em especial a minha mãe e minha irmã que são o meu tesouro e a base que me sustenta e me leva para seguir adiante.

Aos pesquisadores (professores) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelos conhecimentos transmitidos. Em especial ao pessoal do cursos de pós-graduação em Meteorologia.

A todos os que contribuíram com os resultados desta pesquisa: Luiz Flávio Rodrigues, Denis Eiras, Valter Oliveira, Karla Longo, Fernanda Silva, Reynier Hernández, João Alfonso, Roilan Hernández, Marcelo Alonso, Demerval Soares, Rolando Coro.

Aos velhos amigos de Cuba e os novos amigos de Brasil. Em especial a Ronny Maurício, Mylene, Lissette, Roilan, Adrián, Lianet, Arletis, Bruno, João, Raidel, Clara, Nilton, Gilsaine, Carlos, Ricardo, Tania, Ivette, Iara, Carlos.

Muito obrigado a todos os que de uma forma ou outra ajudaram na realização deste trabalho. Meu *Muchas Gracias* para todos.

RESUMO

A utilização dos modelos de previsão numérica do tempo é fundamental para conseguir prever com melhor acurácia e detalhamentos as condições da atmosfera. É preciso utilizar modelos com núcleos dinâmicos eficientes e parametrizações físicas avançadas e adaptadas às regiões de estudo. Essas características, em conjunto com a alta resolução espacial, permitem representar com sucesso o impacto das diferenças morfológicas e da estrutura espacial urbana nos fenômenos meteorológicos, em especial aqueles associados ao tempo severo. Neste trabalho se utilizou como área de estudo a Região Metropolitana de São Paulo para analisar os impactos do material particulado e dos processos de superfície no desenvolvimento de tempestades severas. Foi empregado para isso o sistema CCATT-BRAMS-JULES (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System and Joint UK Land Environment Simulator*). O modelo, além de ser não hidrostático como as versões anteriores, tem novas características e funcionalidades que o deixaram mais eficiente do ponto de vista computacional e na representação dos sistemas meteorológicos. Vários conjuntos de simulações foram realizados com o objetivo de fazer o diagnóstico, a avaliação e a calibração do sistema de modelagem, além de uma comparação no desempenho da representação da precipitação entre o modelo e os produtos derivados a partir de medições de satélites meteorológicos. Posteriormente, com o CCATT-BRAMS-JULES calibrado, foram realizados outros conjuntos de simulações com características específicas para estudar os processos de interação entre os sistemas de tempo severo, a ilha de calor urbana e os aerossóis. Os resultados mostraram que o produto de precipitação derivado de satélite MERGE estimou melhor a precipitação ao ser comparado com outros produtos e com os resultados das simulações feitas com o modelo. Os produtos GSMaP calibrado e GPM_3IMERGHH apresentaram desempenhos semelhantes ao CCATT-BRAMS-JULES. Em relação ao objetivo principal do trabalho, quando foram modificadas exclusivamente as concentrações dos aerossóis na atmosfera, não se observou mudanças nas localizações dos núcleos convectivos e nem nas áreas de máximos e mínimos acumulados de precipitação. As diferenças observadas foram principalmente no tamanho e intensidade dos sistemas de nuvens. As mudanças nas características da superfície, com a substituição da mancha urbana pela vegetação, trouxeram como consequência variações nas localizações das células que formam as tempestades, variando a forma e momentos em que elas passam pelos seus estágios de desenvolvimento. Em relação à intensidade da precipitação, esta sempre foi maior nos testes de sensibilidade em que se realizou a substituição da mancha urbana pela vegetação. Este estudo numérico traz uma contribuição para a avaliação e implementação de um sistema integrado de previsão numérica do tempo e da química da atmosfera, em alta resolução espacial, com o CCATT-BRAMS-JULES.

Palavras-chave: Precipitação. Aerossóis. Superfície Urbana. CCATT-BRAMS-JULES. Parametrização de microfísica.

NUMERICAL STUDY OF THE IMPACTS OF ATMOSPHERIC AEROSOLS AND SURFACE PROCESSES IN THE DEVELOPMENT OF SEVERE STORMS IN URBAN REGIONS

ABSTRACT

The Numerical weather prediction model's usage is essential to be able predict the atmosphere conditions with accurate detail and best estimates. In this case, models with efficient dynamic cores and advanced physical parameterizations adapted to the study regions it is of essential use. These characteristics, jointly with high spatial resolution, allow to represent the impact of morphological differences and urban spatial structure on meteorological phenomena successfully, mainly those related with severe weather. In this research, Metropolitan Region of São Paulo was used as a study area to analyse the particulate material impacts and surface processes in the developing stage of a thunderstorm. CCATT-BRAMS-JULES (Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System and Joint UK Land Environment Simulator) systems were used in this research. The new model version, besides to being non-hydrostatic as the previous versions, include new features and functionalities which turned out to be more efficient from a computational perspective and in the meteorological systems representation. With the objective of diagnosis, validation and calibration of the modeling system, several sets of simulations were performed, besides a comparison in the precipitation representation performance between the model and the derived products from meteorological satellites measurements. Afterwards, with CCATT-BRAMS-JULES system calibrated, other sets of simulations with specific characteristics were performed and analyzed with the aims to study the interaction processes between severe weather systems, the urban island heat effect, and aerosols. The results showed that the precipitation product derived from satellite better estimates precipitation is the MERGE, in comparison with other products and with the simulations results made with the model. The GSMaP products calibrated and GPM_3IMERGHH shows similar performances to the CCATT-BRAMS-JULES. In the main aim of the research, observed that modifying exclusively the concentrations of the aerosols in the atmosphere, do not produce any change in the location of convective core nor in the areas of accumulated maximum and minimum precipitation. The observed differences were mainly in the size and intensity of these cloud systems. Changes in the surface characteristics, as a substitution of the urban region by vegetation, did bring as a consequence variation in the cells location that form the storms, varying the form and the moment in which they pass through their growth stages. In relation to the precipitation intensity, was always higher in the sensitivity tests that vegetation was placed instead of the urban region. This study will contribute to the implementation of an integrated system of numerical weather and chemistry of the atmosphere forecast in high spatial resolution with the CCATT-BRAMS-JULES.

Keywords: Precipitation. Aerosols. Urban Surface. CCATT-BRAMS-JULES. Microphysics parameterization.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Fontes de emissão de poluentes do ar.	10
2.2 Referências para definições de diâmetro equivalente em função das propriedades e do comportamento das partículas.	14
2.3 Esquema idealizado da distribuição multi-modal de tamanho de partículas de aerossol. Principais faixas de tamanho e alguns processos físico-químicos mais relevantes na remoção e formação do material particulado.	15
2.4 Representação dos diferentes mecanismos associados com os impactos das partículas de aerossóis no balanço radiativo, sendo elas relacionadas com os efeitos diretos, indiretos e semi-indiretos.	19
2.5 Evolução dos valores médios das concentrações de CO, MP10T, O ₃ , SO ₂ e NO ₂ medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar CETESB na RMSP, número de veículos por categoria (gasolina, etanol e diesel) e o ano de implementação do PROCONVE).	26
2.6 Mapa conceitual com as isotérmicas que representa uma ilha de calor urbano atmosférica. O centro da figura, que é a área mais quente, é o chamado núcleo urbano.	33
2.7 Transecto da variação da temperatura para uma região urbana e áreas periféricas.	34
2.8 Ciclos diurno e sazonal da intensidade da ICUA na RMSP obtido a partir de dados de estações meteorológicas nessa região.	39
3.1 Região Metropolitana de São Paulo. (a) Mapa tridimensional da topografia da porção leste do Estado de São Paulo, onde se encontra a RMSP. (b) Visão da RMSP com o seu centro densamente urbanizado e o entorno ainda com expressiva presença de vegetação. (c) Municípios e sub-regiões da RMSP.	59
3.2 Mancha urbana da RMSP.	60
3.3 Normais Climatológicas mensal da variável Precipitação para as estações do INMET localizadas: (a) no bairro do Horto Florestal em São Paulo (atualmente desativada), (b) no município de Guarulhos (atualmente desativada), (c) no bairro Mirante de Santana em São Paulo.	62

3.4	Normais Climatológicas mensal da variável Temperatura Média para as estações do INMET localizadas: (a) no bairro do Horto Florestal em São Paulo (atualmente desativada), (b) no município de Guarulhos (atualmente desativada), (c) no bairro Mirante de Santana em São Paulo.	63
3.5	Normais Climatológicas mensal das variáveis Insolação Total e Umidade Relativa. (a) Estação do INMET: Guarulhos (atualmente desativada), variável Insolação Total, (b) Estação do INMET: Mirante de Santana, variável Insolação Total, (c) Estação do INMET: Horto Florestal, variável Umidade Relativa, (d) Estação do INMET: Mirante de Santana, variável Umidade Relativa.	64
3.6	Malha viária da RMSP com os seus 39 municípios destacados por diferentes cores.	67
3.7	Malha viária do município de São Paulo. As cores indicam tipos de vias diferentes.	68
3.8	Localização, dentro da RMSP (linhas mais escuras são os limites dos 39 municípios que compõem a região), das estações do CGE (triângulos vermelhos), da CETESB (estrelas verdes), do INMET (círculos azuis), da estação do IAG-USP (círculo amarelo) e dos pluviômetros do CEMADEN (círculos menores negros). Os retângulos sobre a RMSP indicam subáreas específicas utilizadas na validação do modelo, mais detalhes no Item 3.6.1. Os dados de localização foram disponibilizados pela CETESB, o CGA e o INMET.	71
3.9	Cartas sinóticas de Superfície. (a) Horário 12:00 UTC do dia 05/06/2017, (b) Horário 12:00 UTC do dia 06/06/2017.	76
3.10	(a) Carta Sinótica de 700 hPa, dados das 06:00 UTC do dia 06/06/2017, (b) Carta Sinótica de 500 hPa, dados das 00:00 UTC do dia 06/06/2017.	77
3.11	Imagem do Canal 14 do satélite GOES-16 (06:00 UTC do dia 06/06/2017).	78
3.12	Imagens de refletividade do radar de São Roque no Estado de São Paulo. (a) 05/06/2017 às 12:00 UTC, (b) 06/06/2017 às 06:00 UTC.	79
3.13	Descargas atmosféricas (Nuvem Solo e Intranuvem) registradas pela RINDAT no período entre as 09:00 HL do dia 05/05/17 e as 21:00 HL do dia 06/06/2017.	80
3.14	(a) Carta Sinótica de superfície, dados das 18:00 UTC do dia 24/02/2017, (b) Carta Sinótica de 500 hPa, dados das 00:00 UTC do dia 24/02/2017, (c) Carta Sinótica de 250 hPa, dados das 00:00 UTC do dia 24/02/2017.	82
3.15	Imagens de refletividade do radar de São Roque no Estado de São Paulo. (a) 24/02/2017 às 15:00 UTC, (b) 24/02/2017 às 19:30 UTC.	83

3.16	Descargas atmosféricas (Nuvem Solo e Intranuvem) registradas pela RIN-DAT no período entre as 12:00 HL do dia 24/02/17 e as 21:00 HL do dia 24/02/2017	84
3.17	Alguns dos processos de sub-grade envolvidos na emissão, no transporte e na remoção de gases e aerossóis simulados pelo CCATT-BRAMS-JULES.	87
3.18	Esquema de funcionamento das ferramentas que dão suporte ao CCATT-BRAMS-JULES.	88
3.19	Diagrama ilustrativo da estrutura do modelo de superfície JULES. A cor azul representa os processos relacionados à hidrologia, a verde refere-se aos processos que envolvem diretamente a vegetação e a violeta é referente às trocas de gases e aerossóis com a atmosfera.	90
3.20	Localização sobre superfície dos domínios de estudo utilizados pelo CCATT-BRAMS-JULES. Grades 1, 2 e 3 com resoluções espaciais de 10 km, 5 km e 1 km respectivamente. Ampliação do domínio de 1km na imagem do centro. Subdomínio utilizado para a análise das mudanças da precipitação abrangendo a RMSP na imagem da direita. Em vermelho está destacada a área de mancha urbana que o modelo utiliza a partir dos dados de superfície mencionados no Item 3.4.	99
3.21	Estações de monitoramento atmosférico (variáveis meteorológicas e químicas) no domínio da RMSP, destacando o órgão responsável e área em que se encontram. Os valores vermelhos entre parênteses indicam o número total de estações, seja por redes, seja por áreas ou seja por redes em cada área.	113
3.22	Subdomínio abrangendo a RMSP utilizado na análise da precipitação. Retângulo vermelho indica área utilizada para o estudo da duração da precipitação. Retângulos azul e verde indicam áreas onde se fez o estudo dos hidrometeoros, na análise dos resultados dos teste de sensibilidade, para os casos de estudo 01 e 02 respectivamente.	115
3.23	Malha viária do município de São Paulo separada por categorias. a) Vias Locais. b) Vias Coletoras. c) Vias Primárias. d) Vias Secundárias. e) Vias Estruturais. Os dados foram disponibilizados pela Secretaria de Transporte da Prefeitura de São Paulo	121
3.24	Malha viária dos municípios da RMSP, excetuando São Paulo, separada por categorias. a) Vias Locais, b) Vias Coletoras-Secundárias, c) Vias Primárias, d) Vias Estruturais.	123

3.25	Exemplo da estrutura final dos mapas com os <i>pixels</i> e pontos. Cada quadrado na cor azul é um pixel, os pontos estão localizados no centro do quadrado na cor branca. As linhas negras representam as vias de mobilidade.	124
3.26	Exemplo da estrutura final dos arquivos com a informação georreferenciada das vias de mobilidade. Primeira linha o total de pontos, e as linhas seguintes nas duas colunas representam coordenadas longitude e latitude, respectivamente.	125
4.1	Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados dos CS da série D no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho, especificamente para as simulações no domínio de 1 km de resolução espacial. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.	132
4.2	Diagrama de Taylor com a representação do índice de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação. No diagrama 1-> CS_D1, 2->CS_D2, 3-> CS_D3, 4->CS_D4, 5-> CS_E1, 6-> CS_E2, 7-> CS_E3, B-> CS_E4 e 8-> CS_E5. Todas as simulações destas séries consideram a precipitação total acumulada no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho.	134
4.3	Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados dos CS da série E no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho, especificamente para as simulações no domínio de 1 km de resolução espacial. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.	136
4.4	Distribuição espacial da concentração numérica de aerossóis na superfície da RMSP utilizados na microfísica de nuvens pelo BRAMS-JULES no caso de estudo 01. Valores em /kg. A linha vermelha delimita a região onde foi considerado a maior concentração de aerossóis na superfície dentro do domínio de 1 km.	138

4.5	Representação dos dados do ERA5 (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 05/06/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície (°C) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície (°C) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.	139
4.6	Representação gráfica dos valores médios horários da radiação solar global observados e simulados em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.	141
4.7	Representação gráfica dos valores médios horários para a variável temperatura observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	144
4.8	Representação gráfica dos valores médios horários da umidade relativa observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	146
4.9	Representação gráfica dos valores médios horários da velocidade do vento observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	148

4.10	Representação da precipitação total acumulada para a RMSP e áreas próximas no período entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 15 UTC do dia 06/06/2017 referente ao caso 01. a) Simulação de 1 km de resolução espacial para o CONTROLE_1, b) MERGE, c) GSMaP-C, d) GPM_3IMERGHH, e) TRMM_3B42RT, f) GSMaP, g) CMORPH.	150
4.11	Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação, caso de estudo 01. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_1, M->MERGE, G-> GSMaP-C, N->GSMaP não calibrado, I-> GPM_3IMERGHH, T-> TRMM_3B42RT e C-> CMORPH.	152
4.12	Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados derivados de produtos de satélite e os previstos pelo BRAMS-JULES, especificamente para a simulação no domínio de 1 km de resolução espacial, caso de estudo 01. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de melhor desempenho), (b) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de pior desempenho), (c) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de melhor desempenho), (d) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de pior desempenho).	155
4.13	Representação dos dados do GFS (https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 05/06/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície (°C) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície (°C) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.	157
4.14	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável radiação solar global em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados observados) em análise para o caso de estudo 01. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.	161

4.15	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados da temperatura do JULES em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	163
4.16	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável umidade relativa em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	165
4.17	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável velocidade do vento do JULES em 10 m, e em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 1. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	167
4.18	Representação da precipitação total acumulada para a RMPS e áreas próximas no período entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 15 UTC do dia 06/06/2027. a) Simulação de 1 km CS1_0400, b) Simulação de 1 km CS1_0412, c) Simulação de 1 km CS1_0500, d) Simulação de 1 km CS1_GFS.	168
4.19	Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_1, 1->CS1_0400, 2-> CS1_0412, 3->CS1_0500, 4-> CS1_GFS.	169
4.20	Representação dos acumulados de precipitação associados às simulações pertencentes aos CS1_0400, CS1_0412, CS1_0500 e CS1_GFS. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.	171
4.21	Distribuição espacial da concentração numérica de aerossóis na superfície da RMSP utilizados na microfísica de nuvens pelo BRAMS-JULES no caso de estudo 02. Valores em /kg. A linha vermelha delimita a região onde foi considerado a maior concentração de aerossóis na superfície dentro do domínio de 1 km.	172

4.22	Representação dos dados do ERA5 (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 24/02/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície (°C) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície (°C) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.	173
4.23	Representação gráfica dos valores médios horários da radiação solar global observados e simulados em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.	175
4.24	Representação gráfica dos valores médios horários para a variável temperatura observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	177
4.25	Representação gráfica dos valores médios horários da umidade relativa observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	179
4.26	Representação gráfica dos valores médios horários da velocidade do vento observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	181

4.27	Representação da precipitação total acumulada para a RMSP e áreas próximas no período entre as 15:00 UTC do dia 24/02/2017 e as 00 UTC do dia 25/02/2017 referente ao caso 01. a) Simulação de 1 km de resolução espacial para o CONTROLE_2, b) MERGE, c) GSMaP-C, d) GPM_3IMERGHH, e) TRMM_3B42RT, f) GSMaP, g) CMORPH.	184
4.28	Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação, caso de estudo 02. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_2, M->MERGE, G-> GSMaP-C, N->GSMaP não calibrado, I-> GPM_3IMERGHH, T-> TRMM_3B42RT e C-> CMORPH.	186
4.29	Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados derivados de produtos de satélite e os previstos pelo BRAMS-JULES, especificamente para a simulação no domínio de 1 km de resolução espacial, caso de estudo 02. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de melhor desempenho), (b) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de pior desempenho), (c) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de melhor desempenho), (d) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de pior desempenho).	188
4.30	Representação dos dados do GFS (https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 24/02/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície (°C) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície (°C) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.	190
4.31	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável radiação solar global em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados observados) em análise para o caso de estudo 02. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_2312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.	193

4.32	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados da temperatura do JULES em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_02312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	195
4.33	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável umidade relativa em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_02312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	197
4.34	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável velocidade do vento do JULES em 10 m, e em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 1. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_2312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.	199
4.35	Representação da precipitação total acumulada para a RMPS e áreas próximas no período entre as 15:00 UTC do dia 24/02/2017 e as 00 UTC do dia 25/02/2027. a) Simulação de 1 km CS2_2300, b) Simulação de 1 km CS2_2312, c) Simulação de 1 km CS2_2400, d) Simulação de 1 km CS2_GFS.	201
4.36	Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_2, 1->CS2_2300, 2-> CS2_2312, 3->CS2_2400, 4-> CS2_GFS.	202
4.37	Representação dos acumulados de precipitação associados às simulações pertencentes aos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2400 e CS2_GFS. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.	204

5.1	Representação espacial da precipitação prevista pelo CONTROLE e pelos testes de sensibilidade (S1_1, S1_2, S1_3, S1_4, S1_5, S1_6, S1_7, S1_8) correspondentes ao Caso de Estudo 01. Os números indicam acumulados totais no período de estudo sobre os pontos onde eles se encontram.	209
5.2	Caso de estudo 01: Representação espacial das diferenças entre a precipitação total acumulada no período de estudo pelos testes de sensibilidade e o CONTROLE_1, subdomínio que abrange a RMSP.	210
5.3	Gráficos de frequência relativa (em escala logarítmica) associados aos dados de intensidade de precipitação em cada nodo correspondente ao subdomínio que abrange a RMSP e em cada hora do período de estudo. Caso de estudo 01. (a) Valores de precipitação entre 0 e 38 mm/h, (b) valores de precipitação entre 15 e 38 mm/h.	212
5.4	Histograma incluindo de valores de precipitação acumulada total no subdomínio que abrange a RMSP no período de estudo (barras azuis) e números de nodos do mesmo subdomínio com valores registrados de precipitação horária acima de 15 mm (barras laranjas). Em ambos casos os valores foram normalizados a partir da divisão pelo valor associado ao CONTROLE_1. Dados correspondentes ao caso de estudo 01.	214
5.5	Valores de precipitação total acumulada no subdomínio delimitado pelo retângulo vermelho da Figura 3.22 no período entre as 16:00 UTC e as 20:00 UTC do dia 06/06/2017.	216
5.6	Representação na vertical e no tempo das concentrações em unidades de massa de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8 para a simulação de 1 km de resolução espacial associada ao CONTROLE_1. Valores em g/kg.	217
5.7	Representação na vertical e no tempo das concentrações de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8 em cada teste de sensibilidade para o caso de estudo 01. Na vertical a altura em metros e na horizontal as horas em UTC do período de evento severo.	219
5.8	Gráficos referentes à precipitação na região compreendida entre as latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8. Caso de estudo 01. (a) Precipitação total acumulada (mm), (b) precipitação total acumulada em cada hora do período de estudo (mm/h).	220

5.9	Concentração de hidrometeoros totais sobre o ponto de maior precipitação acumulada para o CONTROLE_1 dentro da região compreendida entre as latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8. As coordenadas do ponto são latitude = -23,27, longitude = -47,25. Gráficos para 4 momentos diferentes dentro do período total de precipitação extrema para o caso de estudo 01. Na vertical a altura em metros e na horizontal a concentração em massa (g/kg) dos hidrometeoros.	222
5.10	Representação espacial da precipitação prevista pelo CONTROLE e pelos testes de sensibilidade (S2_1, S2_2, S2_3, S2_4, S2_5, S2_6, S2_7, S2_8) correspondentes ao Caso de Estudo 02. Os números indicam acumulados totais no período de estudo sobre os pontos onde eles se encontram.	227
5.11	Caso de estudo 02: Representação espacial das diferenças entre a precipitação total acumulada no período de estudo pelos testes de sensibilidade e o CONTROLE_2, subdomínio que abrange a RMSP.	228
5.12	Gráficos de frequência relativa (em escala logarítmica) associados aos dados de intensidade de precipitação em cada nodo correspondente ao subdomínio que abrange a RMSP e em cada hora do período de estudo. Caso de estudo 02. (a) Valores de precipitação entre 0 e 90 mm/h, (b) valores de precipitação entre 50 e 90 mm/h.	230
5.13	Histograma incluindo de valores de precipitação acumulada total no subdomínio que abrange a RMSP no período de estudo (barras azuis) e números de nodos do mesmo subdomínio com valores registrados de precipitação horária acima de 15 mm (barras laranjas). Em ambos casos os valores foram normalizados a partir da divisão pelo valor associado ao CONTROLE_2. Dados correspondentes ao caso de estudo 02.	232
5.14	Valores de precipitação total acumulada no subdomínio delimitado pelo retângulo vermelho da Figura 3.22 no período entre as 00:00 UTC e as 0:00 UTC do dia 25/02/2017	233
5.15	Representação na vertical e no tempo das concentrações em unidades de massa de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9 para a simulação de 1 km de resolução espacial associada ao CONTROLE_2. Valores em g/kg.	235

5.16	Representação na vertical e no tempo das concentrações de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9 em cada teste de sensibilidade para o caso de estudo 02. Na vertical a altura em metros e na horizontal as horas em UTC do período de evento severo.	237
5.17	Gráficos referentes à precipitação na região compreendida entre as latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9. Caso de estudo 02. (a) Precipitação total acumulada (mm), (b) precipitação total acumulada em cada hora do período de estudo (mm/h).	239
5.18	Concentração de hidrometeoros totais sobre o ponto de maior precipitação acumulada para o CONTROLE_2 dentro da região compreendida entre as latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9. As coordenadas do ponto são latitude = -23,57, longitude = -47,91. Gráficos para 4 momentos diferentes dentro do período total de precipitação extrema para o caso de estudo 02. Na vertical a altura em metros e na horizontal a concentração em massa (g/kg) dos hidrometeoros.	240
5.19	Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 16:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	242
5.20	Representação da temperatura em superfície (fundo colorido, oC) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	243
5.21	Representação do calor sensível (fundo colorido, W/m ²) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	244
5.22	Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	245

5.23	Representação da umidade relativa em superfície (fundo colorido, %) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	246
5.24	Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 18:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	247
5.25	Representação das áreas de divergência (fundo colorido, valor real multiplicado por 1000) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 18:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	248
5.26	Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 19:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	249
5.27	Representação das áreas de divergência (fundo colorido, valor real multiplicado por 1000) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 19:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	250
5.28	Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 20:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.	250
6.1	Fluxograma geral do algoritmo da sub-rotina encarregada da distribuição das emissões por categorias de vias de tráfego.	259
6.2	Fragmento do <i>namelist</i> utilizado no PREP-CHEM-SRC com o parâmetro de controle associado ao processo de distribuição por vias de tráfego em áreas urbanas.	260
6.3	Formato e exemplo do arquivo <i>EmissionsRoadCities.dat</i>	262

6.4	Exemplo do arquivo <i>SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat</i> , que inclui as informações referentes às emissões que serão distribuídas por município. .	263
6.5	Região Metropolitana de São Paulo. Em azul logradouros dos municípios incluídos no arquivo <i>SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat</i> . Em cinza logradouros dos municípios não incluídos no arquivo.	266
6.6	Exemplo da distribuição de CO antropogênico (com valores aumentados) utilizando a ferramenta PREP-CHEM-SRC modificada de forma tal que considera a malha viária na RMSP. Valores de emissão em kg/m ²	271
6.7	Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável MP2,5. Linha preta indica valores observados, linha vermelha indica valores relativos ao CS1_CV e linha amarela ao CS1_SV. Período entre as 00:00 UTC do dia 08/06/2017 e 00:00 UTC do dia 10/06/2017.	272

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Estimativa de emissão veicular para a RMSP nos anos entre 2016 e 2018 (1000 ton/ano).	24
2.2 Valores de emissões totais (veiculares mais industriais) das principais espécies poluentes na RMSP para os anos entre 2014 e 2018 estimados pela CETESB (1000 ton/ano).	27
3.1 Quantidade de unidades que compõem a frota total e a frota de veículos pesados nas sub-regiões da RMSP. Ano 2017.	65
3.2 Características dos produtos de precipitação que foram utilizados nesta pesquisa. A calibragem refere-se à utilização de dados registrados nas estações em superfície para melhorar o produto final.	74
3.3 Características gerais, em comum, dos domínios utilizados nos diferentes conjuntos de simulações.	100
3.4 Características dos Conjuntos de Simulações realizados para o diagnóstico inicial do CCATT-BRAMS-JULES em representar as condições ambientais dos casos de estudo.	102
3.5 Características dos conjuntos de simulações realizados para determinar os parâmetros a utilizar relacionados com raio médio e a higroscopicidade das partículas de aerossóis. A série C dos CSs teve o objetivo de determinar o melhor horário para a inicialização enquanto a série D permitiu a escolha da melhor combinação dos parâmetros l e m da microfísica de nuvens.	104
3.6 Características dos Conjuntos de Simulações realizadas para calibrar os valores de concentração de aerossóis utilizados no módulo de microfísica de nuvens. FXX, fator de variação dos aerossóis dentro do código da microfísica no modelo.	105
3.7 Características dos conjuntos de simulações realizados para avaliar a resposta do CCATT-BRAMS-JULES na representação dos casos de estudo ao se fazer a inicialização do sistema em diferentes horários.	106
3.8 Dados de diferenças nas concentrações de MP10T em 8 estações da CETESB comparando os valores médios do período entre 2005 – 2019 e o ano de 2020 para os dias em que ocorreu a maior taxa de isolamento durante a pandemia de SARS-CoV-2 em 2020 (30 e 31 de Março, 1 Abril). Concentrações em $\mu g/m^3$	109

3.9	Características das simulações realizadas para estudar o impacto de mudanças na concentração dos aerossóis e da mancha urbana nos eventos de precipitação extrema nas regiões urbanas. <i>FXX</i> : fator de variação dos aerossóis totais, <i>FXX_i</i> : fator de variação dois aerossóis <i>ice friendly</i> , <i>FXX_w</i> : fator de variação dos aerossóis <i>water friendly</i>	110
3.10	Valores das emissões industriais totais das principais espécies poluentes na RMSP tomando como ano de referência o 2008 (1000 ton/ano) e baseados no Plano de Redução de Emissão de Fontes Estacionárias. . . .	118
3.11	Categorias de vias e tipos associados para o município de SP.	120
3.12	Categorias de vias e tipos associados para a RMSP, excetuando o MSP. . . .	122
3.13	Categorias de vias e número médio de veículos que transitam por elas num dia útil típico no município Rio de Janeiro.	126
3.14	Categorias de vias e porcentagens da emissão total correspondente segundo o município, dados para São Paulo, Cotia e Mairiporã.	127
4.1	Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados aos CS das séries D e E ao ser comparados com os dados registrados nas estações em superfície. DP-> Desvio padrão, REQM-> Raiz do erro quadrático médio, CC-> Coeficiente de correlação, EM-> Erro Médio.	135
4.2	Valores dos diferentes índices estatísticos adotados para avaliar o desempenho do modelo para as variáveis meteorológicas em todas as subáreas dentro da RMSP e para o caso 01 de estudo. São comparados os dados observados e os simulados com o domínio de 1 km de resolução, no período de 48 horas.	142
4.3	Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados aos produtos de precipitação derivados de satélites e à previsão para esta variável feita pelo BRAMS-JULES (ao comparar com os dados observados), assim como para os dados observados nas estações. Caso de estudo 01, junho de 2017.	153
4.4	Índices estatísticos calculados considerando as simulações com domínio de 1 km, dos CS1_0400, CS1_0412, CS1_0500 e CS1_GFS, correspondentes ao caso de estudo 01. Foram consideradas para o cálculo dos índices os resultados obtidos entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e 12:00 UTC do dia 07/06/2017. Os números destacados em vermelho e azul indicam o melhor e pior valor do índice REQM respectivamente para cada variável e cada conjunto de simulação.	160

4.5	Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados às simulações da precipitação acumula pertencentes aos CS1_0400, CS1_0412, CS1_0500 e CS1_GFS na comparação com os valores observados.	170
4.6	Valores dos diferentes índices estatísticos adotados para avaliar o desempenho do modelo para as variáveis meteorológicas em todas as subáreas dentro da RMSP e para o caso 02 de estudo. São comparados os dados observados e os simulados com o domínio de 1 km de resolução, no período de 48 horas.	176
4.7	Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados aos produtos de precipitação derivados de satélites e à previsão para esta variável feita pelo BRAMS-JULES (ao comparar com os dados observados), assim como para os dados observados nas estações. Caso de estudo 02, fevereiro de 2017.	186
4.8	Índices estatísticos calculados considerando as simulações com domínio de 1 km, dos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2400 e CS2_GFS, correspondentes ao caso de estudo 02. Foram consideradas para o cálculo dos índices os resultados obtidos entre as 12:00 UTC do dia 24/02/2017 e 12:00 UTC do dia 26/02/2017. Os números destacados em vermelho e azul indicam o melhor e pior valor do índice REQM respectivamente para cada variável e cada conjunto de simulação.	192
4.9	Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados às simulações da precipitação acumula pertencentes aos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2400 e CS2_GFS na comparação com os valores observados.	202
6.1	Exemplos de situações configuradas pelo usuário e versões com as características do arquivo <i>SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat</i> a ser utilizado em cada caso.	267
6.2	Índices estatísticos obtidos na comparação entre as estimativas das simulações CS1_SV e CS1_CV e os dados observados para o período entre as 00:00 UTC do dia 08/06/2017 e 00:00 UTC do dia 10/06/2017. Variável MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	272

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3BEM	–	<i>Brazilian Biomass Burning Emission Model</i>
AERONET	–	<i>Aerosol Robotic Network</i>
AL	–	Alameda
AV	–	Avenida
BDG	–	Base de dados global
BEM-BEP	–	<i>Building Effect Parameterization</i>
BRAMS	–	<i>Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System</i>
BT	–	Baía de terminal
CB-07	–	<i>Carbon Bond Mechanism version 07</i>
CC	–	coeficiente de correlação de Pearson
CCATT-BRAMS-JULES	–	<i>Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System and Joint UK Land Environment Simulator</i>
CDP	–	Ciclo Diurno da Precipitação
CEM	–	Centro de Estudos da Metrópole
CEMADEN	–	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CERES	–	<i>Clouds Earths Radiant Energy System</i>
CET	–	Companhia de Engenharia de Tráfego
CETESB	–	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFL	–	<i>Courant–Friedrichs–Lewy</i>
CFORS	–	<i>Chemical Weather FORecast System</i>
CGE	–	Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo
CH ₄	–	Metano
CLP	–	Camada Limite Plantária
CMORPH	–	<i>Morphing Technique</i>
CO	–	Monóxido de Carbono
CONAMA	–	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV's	–	Compostos Orgânicos Voláteis
CPC	–	<i>Climate Prediction Center</i>
CPTEC/INPE	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CS	–	Conjunto de simulações
CSs	–	Conjuntos de simulações
CV	–	Complexo Viario
CWA	–	Clima subtropical com verões úmidos e quentes e invernos secos (classificação climática de Köppen-Geiger)
DENATRAN	–	Departamento Nacional de Trânsito
DETRAN/SP	–	Departamento de Trânsito do Estado de São Paulo
DGHM	–	Distribuição de emissões quase-homogênea nos municípios
DHM	–	Distribuição homogênea por municípios

DP	– Desvio padrão
DPR	– <i>Dual-frequency precipitation radar</i>
DSA	– Divisão de Satélites Ambientais
DVM	– Distribuição da emissão veicular por vias
EAC4	– <i>ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4</i>
ECMWF	– <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EDGAR	– <i>Emission Database for Global Atmospheric Research</i>
EM	– Erro médio
ENOS	– El Niño Oscilação Sul
ES	– Estrada
FAPESP	– Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FAST-TUV	– <i>FastTropospheric Ultraviolet-Visible</i>
FV3	– <i>Finite-Volume on a Cubed-Sphere</i>
FVC	– Fator de Visão do Céu
GEIA/ACCENT	– <i>Global Emissions Inventory Activity / Atmospheric Composition Change the European Network)</i>
GEOS-DAS	– <i>Goddard Earth Observing System Data Assimilation System</i>
GFS	– <i>Global Forecast System</i>
GMI	– <i>GPM microwave imager</i>
GOCART	– <i>Geórgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport Model</i>
GOES - WF ABBA	– <i>Geostationary Operational Environmental Satellite with Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm</i>
GOES AVHRR	– <i>Geostationary Operational Environmental Satellite Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
GOES-16	– <i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPM	– <i>Global Precipitation Measurement</i>
GrADS	– <i>GridAnalysis and Display System</i>
GSMaP	– <i>Global Satellite Mapping of Precipitation</i>
HC	– Hidrocarbonetos
HL	– Hora Local
IAG	– Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	– Ilha de Calor Urbano
ICUA	– Ilha de Calor Urbana Atmosférica
ICUs	– Ilhas de Calor Urbano
ICUS	– Ilha de Calor Urbano Superficial
IGBP-INPE	– <i>International Geosphere-Biosphere Programme INPE</i>
IICU	– Intensidade da Ilha de Calor Urbano
IMERG	– <i>Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM</i>
INMET	– Instituto de Meteorologia
ITA	– Instituto Tecnológico de Aeronáutica
JAXA	– <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JBN	– Jato de Baixos Níveis
K	– Coeficiente de Difusividade

LES	– <i>Large Eddy Simulations</i>
LG	– Largo
LIDAR	– <i>Light Detection and Ranging</i>
LO	– Rodovia Dutra
LSI	– <i>Lightning Imaging Sensor</i>
MACCM3	– <i>Middle Atmosphere version of the Community Climate Model</i>
MDF	– Método das Diferenças Finitas
ME	– Método Espectral
MEF	– Método dos Volumes Finitos
MEGAN	– <i>Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature</i>
MMA	– Ministério do Meio Ambiente
MOCAGE	– <i>MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle</i>
MODIS	– <i>Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer</i>
MOSES	– <i>Met Office Surface Exchange Scheme</i>
MOZART	– <i>Model of Ozone and Related Chemical Tracers</i>
MP	– Material Particulado
MP10	– Partículas de aerossóis da fração grossa
MP10T	– Partículas inaláveis de diâmetro menos a 10 μm
MP2,5	– Partículas de aerossóis da fração fina
MQ	– Mecanismos químicos
MR	– Marginal
M-SPACK	– <i>Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics</i>
MVF	– Método dos Volumes Finitos
NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NC	– Núcleos de condensação
NCEP	– <i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCG	– NC gigantes
NCN	– Núcleos de Condensação de Nuvens
NCN	– Núcleos de condensação de nuvens
NG	– Núcleos de Gelo
NO	– Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	– Dióxido de nitrogênio
NO _x	– Oxidos de Nitrogênio
NOAA	– <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
O ₃	– Ozônio
OGE	– <i>Olson Global Ecosystem</i>
PFT's	– <i>Plant functional types</i>
PIB	– Produto Interno Bruto
PNT	– Previsão Numérica do Tempo
PR	– <i>Precipitation Radar</i>
PREP-CHEM-SRC	– Preprocessador de emissões
PROCONVE	– Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
PS	– Passagem
R	– Rua
RA	– Rodoanel

RACM	–	<i>Regional Atmospheric Chemistry Mechanism</i>
RADAMBRASIL	–	Radar na Amazônia Brasil
RADM2	–	<i>Regional Acid Deposition Model, version 2</i>
RAMS	–	<i>Regional Atmospheric Modelling System</i>
RAMSPOST	–	<i>RAMS-POST processing</i>
RCHO	–	Aldeídos
RELACS	–	<i>Regional Lumped Atmospheric Chemical Scheme</i>
REQM	–	raiz do erro quadrático médio
RETRO	–	<i>Reanalysis of the Tropospheric chemical composition</i>
RINDAT	–	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RK3	–	Método de Runge-Kutta de ordem três
RMSP	–	Região Metropolitana de São Paulo
RRTMG	–	<i>Rapid Radiation Transfer Model, versão para GCMs</i>
RV	–	Rodovia
SEADE	–	Fundação Estadual de Análise de Dados
SO ₂	–	Dióxido de Enxofre
SO _x	–	Dióxidos de Enxofre
TMI	–	<i>TRMM Microwave Imager</i>
TRMM	–	<i>The Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
TSM	–	Temperatura Superficial do Mar
UTC	–	<i>Universal Time Coordinated</i>
VA	–	Via
VCAN	–	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
VD	–	Viaduto
VIRS	–	<i>Visible Infrared Scanner</i>
WRF	–	<i>Weather Research and Forecasting Model</i>
WRF/CHem	–	<i>Chemical Weather Research and Forecasting Model</i>
ZCAS	–	Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

- $N_{cn,i}$ – concentração total de partículas
 $\sigma_{g,i}$ – desvio padrão geométrico
 $D_{g,i}$ – diâmetro geométrico médio
 \hat{v} – média de uma determinada variável
 v' – flutuação em torno da média de uma determinada variável
 k – Valor inteiro
 $f(m)$ – função de distribuição de tamanho

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTO TEÓRICO .	7
2.1 Poluição do ar. Material Particulado, influência na meteorologia.	7
2.1.1 Principais agentes poluidores e suas fontes de emissão.	8
2.1.2 Influência das condições meteorológicas nos níveis e destino da poluição atmosférica.	10
2.1.3 Material Particulado: principais características.	13
2.1.3.1 Influência do material particulado no balanço radiativo e na formação de nuvens.	17
2.1.4 Poluição do ar em regiões urbanas.	21
2.1.4.1 Emissão veicular de poluentes.	22
2.1.4.2 Emissões na RMSP e características dos poluentes.	24
2.1.5 Estudos sobre o impacto do Material Particulado na precipitação em regiões urbanas.	28
2.2 Influência das características da superfície urbana na atmosfera. Ilha de calor.	31
2.2.1 Relação entre superfície, ilha de calor e tempo severo em regiões urbanas.	37
2.2.2 Ilha de calor na RMSP.	39
2.3 Modelos numéricos de previsão do tempo meteorológico e da química da atmosfera.	42
2.3.1 Base física e matemática dos modelos numéricos na meteorologia, as suas componentes.	45
2.3.1.1 Núcleo dinâmico dos modelos de PNT.	47
2.3.1.2 Base teórica da parametrização de cúmulos e da microfísica de nuvens.	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 Descrição da área de estudo.	57
3.1.1 Características geográficas e meteorológicas.	57
3.1.2 Características da frota veicular e da malha viária.	65
3.2 Observações meteorológicas e da química da atmosfera.	68
3.2.1 Estações de superfície.	69

3.2.2	Produtos de estimativas de precipitação por satélite de alta resolução. Caracterização.	72
3.3	Casos de estudo. Definição e características.	74
3.3.1	Caso 01: 5 e 6 de junho 2017.	75
3.3.2	Caso 02: 24 e 25 de fevereiro 2017.	80
3.4	Sistema de modelagem acoplado CCATT-BRAMS-JULES. Ferramentas auxiliares.	85
3.4.1	Modelo de Superfície JULES.	89
3.4.2	Núcleo dinâmico do modelo BRAMS.	91
3.4.3	Esquemas de microfísica de nuvens no CCATT-BRAMS-JULES. Es- quema de Thompson de dois momentos.	93
3.4.4	Pré-processador de emissões PREP-CHEM-SRC.	96
3.5	Características, configurações e objetivos das simulações realizadas com o CCATT-BRAMS-JULES.	98
3.5.1	Configurações gerais das simulações.	98
3.5.2	Simulações para o diagnóstico, calibração e validação do sistema de modelagem. Obtenção do CONTROLE.	102
3.5.3	Simulações para o estudo da sensibilidade às mudanças nas proprieda- des dos aerossóis e da superfície urbana.	107
3.6	Estratégia geral para análise dos resultados obtidos nas simulações. . . .	111
3.6.1	Metodologia para a análise dos resultados obtidos nas etapas de diag- nóstico, calibração e validação.	111
3.6.2	Metodologia para a análises dos testes sensibilidade.	114
3.7	Aprimoramento da representação de emissões utilizando a ferramenta PREP-CHEM-SRC.	116
3.7.1	Quantificação da emissão veicular e industrial por municípios da RMSP.117	
3.7.2	Processamento dos dados da malha viária na RMSP.	119
3.7.3	Emissão segundo tipo de vias para cada município.	126
4	ESTUDO DE CASOS: DIAGNÓSTICO, CALIBRAÇÃO E VA- LIDAÇÃO DO SISTEMA DE MODELAGEM.	129
4.1	Calibração dos parâmetros dos aerossóis atmosféricos associados à mi- crofísica de nuvens.	129
4.2	Caso de estudo 01: 5, 6 e 7 de junho de 2017.	137
4.2.1	Resultados da simulação CONTROLE_1.	137
4.2.2	Estudo do impacto das mudanças nas condições iniciais e de contorno nos resultados das simulações para o caso de estudo 01.	156
4.3	Caso de estudo 02: 24, 25 e 26 fevereiro de 2017.	171

4.3.1	Resultados da simulação CONTROLE_2.	171
4.3.2	Estudo do impacto das mudanças nas condições iniciais e de contorno nos resultados das simulações para o caso de estudo 02.	189
5	IMPACTOS DAS MUDANÇAS NA CONCENTRAÇÃO E NAS PROPRIEDADES MICROFÍSICAS DOS AEROSSÓIS E NA COBERTURA DA SUPERFÍCIE NA PRECIPITAÇÃO. ANÁLISE DOS CASOS DE ESTUDO NA RMSP.	205
5.1	Caso de estudo 01: Análise dos Testes de Sensibilidade.	205
5.1.1	Efeitos na Precipitação. Caso de estudo 01	205
5.1.2	Análise das características dos hidrometeoros. Caso de estudo 01	216
5.2	Caso de estudo 02: Análise dos Testes de Sensibilidade.	223
5.2.1	Efeitos na Precipitação. Caso de estudo 02	223
5.2.2	Análise das características dos hidrometeoros. Caso de estudo 02	234
5.2.3	Impacto da Superfície no desenvolvimento de Tempestades Severas. Caso de estudo 02	241
6	APRIMORAMENTO DA REPRESENTAÇÃO DE EMISSÕES UTILIZANDO A FERRAMENTA PREP-CHEM-SRC	253
6.1	Funcionalidades implementadas na ferramenta PREP-CHEM-SRC.	253
6.1.1	Modificações e novo código programado no PREP-CHEM-SRC.	254
6.1.2	Novas opções e considerações relacionadas com o processo implementado de distribuição de emissões, na perspectiva do usuário.	260
6.1.3	Resultados preliminares utilizando o distribuição de emissões considerando a malha viária.	270
7	CONCLUSÕES	273
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	279

1 INTRODUÇÃO

Com áreas urbanas cada vez mais extensas e densamente povoadas, um número maior de pessoas ficam expostas aos perigos que podem surgir ante a presença de eventos meteorológicos de tempo severo associado a chuva intensa. Atualmente se estima que aproximadamente 55% da população mundial vive em regiões urbanas, valor que espera-se aumentar para 70% até o ano de 2050 ([ORGANIZAÇÃO DE NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2016](#)). Inundações, deslizamentos de terra e prejuízos nas construções são alguns dos exemplos de danos que estes eventos podem provocar, causando grandes perdas na economia e de vidas humanas. Além disso, ocorrem transtornos no trânsito e, em diversas ocasiões, predispõe a disseminação de doenças.

Contar com um sistema de previsão de tempo eficiente, que permita prever de forma satisfatória a ocorrência desses fenômenos, pode ajudar a diminuir drasticamente os danos causados, se os canais de comunicação forem eficientes para transmitir a informação a tempo para a população e as instituições do governo tomadoras de decisões. Para isso, é preciso entender as causas que contribuem a ocorrência desses fenômenos. Os eventos de tempo severo, mesmo que sejam predominantemente governados pela dinâmica da atmosfera, podem ser influenciados pelas alterações do meio geradas pelos processos antropogênicos, que estimulam a intensificação desses eventos tanto em frequência quanto em extensão de impacto. Com o aumento da extensão urbanizada e todos os processos que estão associados, dois fatores que podem influir nos eventos de tempo severo são favorecidos. Esses fatores são o desenvolvimento e intensificação da ilha de calor urbano (ICU) e o aumento substancial da poluição do ar pelo aumento das emissões.

A ICU uma das manifestações mais importantes do complexo sistema do microclima urbano, pois ela interage de forma direta e indireta com outros fatores ([AKBARI et al., 2008](#)). Destacam-se as modificações na circulação do vento local provocadas pela ICU, que tem potencial para induzir as modificações nos sistemas de tempo severo. A ICU é a principal causa da formação de uma circulação local típica de áreas urbanas, conhecida nas pesquisas científicas como brisa urbana e que se caracteriza pela convergência dos ventos na superfície e a divergência no topo da Camada Limite Planetária (CLP) ([SILVA, 1986](#)). É precisamente a CLP, onde a turbulência é a característica predominante, o componente fundamental que permite entender melhor a influência da ICU no regime de tempestades e precipitação. Ela apresenta, nas cidades, um perfil vertical térmico diferente das áreas adjacentes rurais, devido principalmente ao fluxo de calor sensível liberado pela camada do dossel urbano.

Múltiplas pesquisas foram realizadas para compreender melhor a influência real da ICU sobre os sistemas de tempo severo em diferentes regiões do mundo, (DIXON; MOTE, 2003; LEI et al., 2008; GOUVêA et al., 2006; LAL; PAWAR, 2011). Tem se verificado que a interação entre a brisa marítima e a ICU é mais significativa quando regiões urbanas maiores estão envolvidas e estas estão a uma distância tal da costa que permita que a ICU possa se desenvolver. No entanto, os processos de interação ainda precisam ser melhor estudados pela complexidade que eles representam.

O aumento da poluição do ar nas áreas urbanas também influi sobre as características dos sistemas de tempo severo, principalmente o aumento da concentração de material particulado que pode atuar como núcleos de condensação de nuvens (NCN) e núcleos e Gelo (NG) e alterar propriedades microfísicas das nuvens como número e distribuição de tamanho das gotículas. Além desse aspecto, os aerossóis modificam o balanço radiativo na atmosfera, sendo capazes de espalhar ou absorver parte da radiação de onda curta proveniente do sol, conseqüentemente, afetando o balanço de energia na superfície e na coluna atmosférica. Existem vários estudos (DAGAN et al., 2015; MCFIGGANS et al., 2006; KOREN et al., 2012; THOMPSON et al., 2008; LEE et al., 2018; ZHOU et al., 2018; ZHANG et al., 2020; LIU et al., 2020), sobre como as mudanças na quantidade e propriedades dos aerossóis afetam as propriedades das nuvens convectivas. Koren et al. (2012) obteve como resultado que em nuvens com altas concentrações de aerossóis o início do processo de colisão-coalescência pode ser atrasado. No entanto, ainda não existem um consenso em relação a esses aspectos, enquanto por um lado sugere-se que o aumento na concentração de partículas de aerossóis resulta em evaporação mais eficiente das gotículas e, por tanto em nuvens menos desenvolvidas, por outro lado estudos sugerem haver uma revigoração das nuvens. O que se tem claro é que o impacto das concentrações e distribuição dos aerossóis sobre os sistemas de tempo severo são diferentes para cada região de estudo, pois ele depende de aspectos específicos como a localização e as características meteorológicas dominantes.

Nesse contexto de complexidade, para compreender os processos de interação entre os efeitos da ilha de calor urbana e da poluição atmosférica com os sistemas de tempos severo, os modelos de previsão numérica do tempo (PNT) têm um papel fundamental. Quando utilizados modelos adequados para estudos de escala local, com alta resolução espacial e inclusão de representação explícita do processo de formação de nuvens e de processos de superfície urbana, acredita-se ser possível obter resultados mais apropriados a serem utilizados para gerar ações mitigatórias dos danos causados pelos sistemas de tempo severo. Para isso é necessário desenvolver modelos com núcleos dinâmicos mais acurados que permitam aumentar a resolução espacial utilizada nas integrações e acuradamente representar explicitamente as circulações convectivas e associados sistemas de tempo severo.

A realização de simulações com os modelos de PNT fazendo uso de altas resoluções espaciais permite a redução do nível de parametrizações e diminuição nos erros de truncamentos das aproximações, o que favorece a melhor representação dos processos de pequena escala (FREITAS et al., 2007). Uma das pesquisas relacionada com o tema é a realizada por Ronda et al. (2017), nela se apresentam os resultados obtidos com um sistema de modelagem numérico de previsão de tempo, utilizando resolução espacial de até 100 metros, para uma grande área urbana (Amsterdam, Holanda). Essa altíssima resolução espacial empregada propiciou a determinação com sucesso do impacto das características morfológicas urbanas e da estrutura espacial urbana nas temperaturas locais.

É com base em toda a situação exposta anteriormente que se propõe como objetivo principal da presente pesquisa estudar os impactos da poluição atmosférica, notadamente material particulado, e de processos de superfície no desenvolvimento de tempestades severas em regiões urbanas. Para isso, selecionou-se a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), maior conglomerado urbano da América Latina e um dos maiores do mundo, onde atualmente moram mais do 50% da população total do estado de São Paulo e quase o 10% da população total do país (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE., 2021). Estudos para esta região tem demonstrado altas emissões anuais de material particulado, sendo que quase o 30% do total delas está associada com o setor do transporte (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB., 2020).

Também observou-se que o padrão de ilha de calor na RMSP forma uma zona de convergência no centro da cidade de São Paulo, que atua para acelerar a chegada da frente de brisa marítima até essa mesma região (FREITAS et al., 2007). Em decorrência dessa forte zona de convergência no centro da cidade, as circulações induzidas a partir da RMSP atuam no sentido de bloquear a brisa marítima ao longo da cidade por cerca de duas horas, carregando uma grande quantidade de umidade da superfície para níveis superiores da atmosfera urbana. No entanto, posteriormente, a brisa marítima avança além da cidade quando a ilha de calor se dissipa. Já (SILVA, 1986) verificou que há um atraso na chegada do frente de brisa marítima na RMSP em decorrência da presença da região urbana.

Como ferramenta fundamental para o presente estudo se utilizou o sistema de modelagem CCATT-BRAMS-JULES constituído pelo acoplamento dos modelos CCATT (*Coupled Aerosol and Tracer Transport model*), BRAMS (*Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System*) e JULES (*Joint UK Land Environment Simulator*) que, em conjunto, calculam os aspectos relacionados com a química da atmosfera e a meteorologia, considerando as diferentes características da superfície. Outras ferramentas auxiliares como o PREP-CHEM-SRC para o tratamento das emissões atmosféricas também foram utilizadas. O módulo de microfísica do CCATT-BRAMS-JULES foi fundamental para o estudo do impacto do material particulado nos eventos de precipitação extrema. A microfísica implementada é a de tipo *bulk* de dois momentos (THOMPSON et al., 2008; THOMPSON; EIDHAMMER, 2014)

A pesquisa proposta tem duas vertentes fundamentais, uma que aborda aspectos relacionados com o diagnóstico, avaliação, calibração e implementação de funcionalidades no CCATT-BRAMS-JULES, e outra vertente estudou de forma direta a interação entre a superfície, os poluentes e o desenvolvimento de tempo severo, sendo que para isso foram realizadas e analisadas diferentes simulações com características específicas.

Para a realização deste trabalho foram cumpridos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho do CCATT-BRAMS-JULES na previsão de tempo e composição da atmosfera para a Região Metropolitana de São Paulo com foco em períodos de ocorrência de eventos extremos de precipitação. O estudo empregará o estado-da-arte em parametrizações físicas de superfície, aerossóis e microfísica de nuvens presentes no BRAMS e fará uso de uma ampla rede de dados observados para avaliar os resultados das simulações.

- Avaliar e validar a nova versão do CCATT-BRAMS-SRC que teve a inclusão de um novo núcleo dinâmico favorecendo a realização de simulações com resoluções temporais menores, o que permite a utilização de melhor resolução espacial, trazendo ganhos significativos, sem perderem eficiência e sem aumentar o custo computacional.
- Aprimorar a representação das partículas do aerossol urbano no modelo utilizados na microfísica de nuvens, no que diz respeito à sua concentração e distribuição e às suas propriedades de relevância para o estudo, isto é, suas propriedades microfísicas (raio médio das partículas e higroscopicidade).
- Comparar os resultados da previsão da precipitação pelo CCATT-BRAMS-JULES ao se utilizar alta resolução espacial, com os produtos de precipitação derivados de medições com satélites.
- Analisar o impacto das diferentes condições iniciais e de contorno, utilizadas pelo sistema de modelagem, nos resultados das previsões das condições atmosféricas e especificamente na representação dos eventos de tempo severo na região urbana de estudo.
- Analisar, a partir da realização de testes de sensibilidade com o CCATT-BRAMS-JULES, a interação entre as características antrópicas marcantes da região urbana, isto é, a ilha de calor e a poluição do ar, e a sua influência nas simulações do tempo severo na RMSP.
- Aprimorar a representações das emissões de poluentes e principalmente de aerossóis nas regiões urbanas, para que seja possível, em futuras pesquisas, implementar o processo de retroalimentação entre a microfísica e o prognóstico dos aerossóis, que são tratados de forma implícita pelo sistema de modelagem com a ativação do módulo CCATT. Foi utilizada a ferramenta de geração de emissões PREP-CHEM-SRC.

O conteúdo deste documento, apresentado a seguir, encontra-se estruturado da seguinte forma: primeiramente são apresentados os objetivos, tanto principal como específicos. Na sequência, os fundamentos teóricos e revisão bibliográfica, onde se abordam os temas de poluição do ar como foco no material particulado, ilha de calor urbana e modelos numéricos de previsão do tempo meteorológico e da química da atmosfera, focando nos estudos relacionados com a RMSP. Posteriormente, inclui-se a metodologia a ser utilizada para cumprir os objetivos e uma descrição detalhada sobre os materiais empregados. Na sequência são apresentados os resultados obtidos no diagnóstico, calibração e validação do CCATT-BRAMS-JULES. No capítulo 5 se descrevem os impactos das mudanças na concentração e nas propriedades de microfísica dos aerossóis e na cobertura da superfície na precipitação a partir de um análise de caso. Por último os resultados relacionados com o aprimoramento da representação das emissões urbanas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTO TEÓRICO

Neste Capítulo são abordados aspectos teóricos relacionados com os três temas principais deste trabalho: a) poluentes atmosféricos, com foco no material particulado; b) superfície urbana e o efeito das ilhas de calor; c) acoplamento da previsão numérica do tempo meteorológico e da química da atmosfera.

A seguir são apresentados os conteúdos sobre: a definição de material particulado assim como suas principais características, os efeitos no clima e na meteorologia da poluição atmosférica, com especial foco na influência do material particulado no balanço radiativo da atmosfera e na formação de nuvens. Define-se também o conceito de ilha de calor urbana e discute-se sobre o seu impacto na formação de tempo severo e regimes de poluição. Ademais, são apresentados e revisados diversos estudos que abordam os aspectos mencionados anteriormente, e em que foram obtidos resultados que ajudaram a formular e a responder o problema fundamental desta pesquisa. Informação detalhada é também especificada para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). No final do Capítulo são apresentados aspectos relevantes sobre os modelos numéricos utilizados na meteorologia e seus diferentes componentes, com particular ênfase no tema da parametrização de microfísica de nuvens.

2.1 Poluição do ar. Material Particulado, influência na meteorologia.

A poluição do ar, parte importante da poluição ambiental, é uma problemática da atualidade e de grande relevância, pois, afeta consideravelmente, de forma direta e diversa, a vida dos seres humanos e de outros organismos (KAMPA; CASTANAS, 2008), (SAXENA; SRIVASTAVA, 2020). Ela pode ser observada em grande escala, pois, não reconhece fronteiras, e ao mesmo tempo na escala local. Aumento na sua intensidade pode ser associado à presença de regiões urbanas ou simplesmente à presença do homem e as atividades econômicas inerentes (SEINFELD, 1986).

Na bibliografia científica que trata temas vinculados à poluição do ar ou poluição atmosférica pode-se encontrar várias definições para este conceito com diferentes enfoques. Uma delas define a poluição atmosférica como a introdução no ar de substâncias nocivas em uma taxa que excede a capacidade dos processos naturais da atmosfera para transformá-las, deposita-las ou dilui-las (YASSI et al., 2002). Já Zaldivar (2013), atendendo mais às consequências danosas, define a poluição do ar como a presença de material e formas de energia numa proporção tal que implique riscos, danos ou moléstias graves para as pessoas ou bens de qualquer natureza.

Também, a poluição atmosférica é comumente identificada como o estado da atmosfera no qual as substâncias nocivas estão presentes em concentrações maiores que num ambiente normal ou atmosfera limpa (SEINFELD, 1986).

É importante entender também o significado do termo concentração de um composto, segundo (ARYA, 1999) é a razão entre a quantidade numérica ou mássica deste e o volume da solução em que se encontra dissolvido, que no caso da atmosfera é o ar. A concentração de um composto na atmosfera (gás ou particulado) vai depender da taxa em que este é emitido, dos processos de produção e remoção e das características meteorológicas (LAWRENCE et al., 1999), a ser abordado no Item 2.1.2. Os seres humanos, em ambientes poluídos, sofrem efeitos prejudiciais à sua saúde no curto, médio e longo prazo. Nas últimas décadas, pesquisas têm demonstrado a estreita relação que existe entre exposição ao ar poluído e o desenvolvimento de diferentes doenças pela população (ROSALES-CASTILLO et al., 2000; SILLMAN, 2005).

2.1.1 Principais agentes poluidores e suas fontes de emissão.

Muitas substâncias podem ser definidas como poluentes atmosféricos, e muitas são as fontes de emissão. No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA no 03/1990, que também estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar, define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora;
- prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT., 2011).

De forma geral, os poluentes do ar podem ser classificados, pelo seu estado físico, em particulado (ver Item 2.1.3) e gasoso (que podem ser orgânicos e inorgânicos). Entre os principais contribuintes para as emissões de poluentes gasosos em ambientes urbanos estão o setor de transporte e a indústria (DAMILANO, 2006).

Outra classificação é a que divide os poluentes em duas categorias: primários e secundários. Os primeiros são emitidos diretamente na atmosfera. São exemplos de poluentes primários: Monóxido de carbono (CO), uma parcela do material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x = monóxido de nitrogênio (NO) + dióxido de nitrogênio (NO₂) e hidrocarbonetos (HC) (grupo que forma parte dos compostos orgânicos voláteis (COV's)).

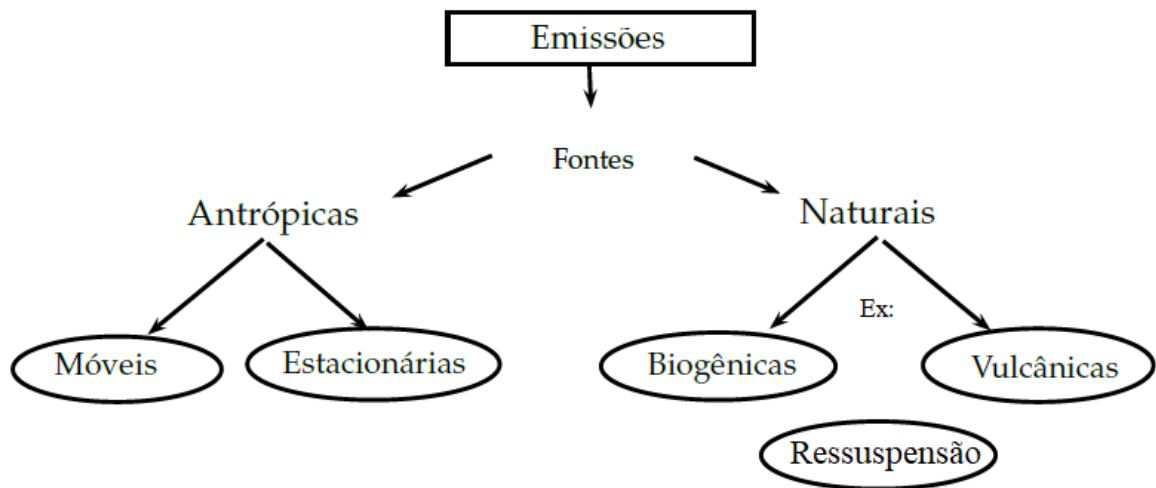
Os poluentes secundários são formados na atmosfera via reações fotoquímicas envolvendo alguns dos poluentes primários e os constituintes naturais da atmosfera na presença de radiação solar. O ozônio (O₃) é representativo desse tipo de poluente, vindo a ser um subproduto de reações entre os NO_x e os COV's na presença de luz solar (DERWENT et al., 2003). Outro poluente secundário importante pode ser o material particulado, em especial os que têm como principais precursores o SO₂ e os NO_x.

Existem dois tipos de fontes de emissão de poluentes: naturais, que inclui todos os processos naturais de emissão que acontecem desde o surgimento da atmosfera terrestre, e antrópicas, que são as associadas às atividades do ser humano. Como exemplos das fontes naturais temos as emissões biogênicas, como é o caso da liberação de hidrocarbonetos pelas plantas, as vulcânicas, a própria ação do vento que contribui principalmente com a introdução do material particulado no ar via ressuspensão de partículas do solo, e fazendo com que alcance e se disperse pela Camada Limite Planetária (CLP), e dependendo das características do material, alcançando camadas superiores (SEINFELD; PANDIS, 1998). Temos também os aerossóis marinhos, oriundos da maior fonte natural, isto é, os oceanos. As fontes antrópicas podem ser divididas em duas categorias: estacionárias, ou fontes fixas como também são conhecidas, e móveis.

As fontes estacionárias, em função da sua natureza, se dividem em três subgrupos. O primeiro deles relacionado com a queima de resíduos sólidos (emitindo material particulado, dióxido e trióxido de enxofre, ácido clorídrico e óxidos de nitrogênio), e tendo como principal exemplo as queimadas que ocorrem nos diferentes biomas distribuídos ao longo dos continentes. Um segundo subgrupo inclui toda a atividade não industrial onde se realiza a queima de combustíveis fósseis, por exemplo, os fornos das padarias e dos diferentes centros de elaboração de alimentos. Por último, temos a emissão dos processos industriais que tendem a ocorrer principalmente nas proximidades de grandes regiões urbanas.

Por outro lado, as fontes móveis incluem todos os meios de transporte que utilizam a queima de combustíveis fósseis como principal fonte de energia. Se subdividem em veículos automotores terrestres (que serão tratadas separadamente no Item 2.1.4.1 pela sua relevância no presente trabalho), aviões, trens e barcos. Estes dois últimos emitindo principalmente óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio. Na Figura 2.1 é apresentado um resumo com as principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos.

Figura 2.1 - Fontes de emissão de poluentes do ar.



Fonte: Produção do autor.

2.1.2 Influência das condições meteorológicas nos níveis e destino da poluição atmosférica.

Os poluentes são emitidos para atmosfera e, entre outros processos, são transportados pelas massas de ar até que atinjam um receptor. Este processo específico, denominado de dispersão atmosférica, é diferente para cada tipo de poluente e em geral quanto maior a distância do receptor em relação à fonte, menor os níveis de concentração a que o receptor estará exposto. Isto acontece porque inúmeros fatores atuam sobre as massas de ar e, conseqüentemente, sobre o transporte desses poluentes, provocando variações na concentração do poluente via diferentes processos como deposição, difusão e reações químicas. Alguns destes fatores são:

- Topografia urbana;
- condições topográficas naturais;
- processos de remoção/deposição de poluentes.

Apesar desses fatores atuarem em conjunto, são as condições meteorológicas que de forma mais complexa influenciam na dispersão e, conseqüentemente, na concentração dos poluentes na atmosfera. Vários estudos contribuem para validar essa afirmação. Um exemplo é o trabalho feito por [Carvalho \(2010\)](#), onde o autor expõe uma extensa revisão bibliográfica sobre a influência das condições meteorológicas nas concentrações de ozônio em São Paulo e Rio de Janeiro. Também [Rojas \(2013\)](#) realizou um estudo sobre as condições meteorológicas e os níveis de poluição na Região Metropolitana de Lima, obtendo resultados sobre a influência de fatores como a brisa e a circulação geral da atmosfera na dispersão dos poluentes.

Concentrações atmosféricas completamente diferentes poderão ser medidas em condições idênticas de emissão de poluentes mas em situações meteorológicas distintas. O regime dos ventos, a umidade do ar, a radiação solar, a temperatura ambiente, a opacidade atmosférica, a estabilidade atmosférica, a altura da CLP e a ocorrência de chuvas são alguns fatores locais que podem interferir no tempo de permanência dos poluentes na atmosfera. A circulação geral da atmosfera também interfere na dispersão diretamente, influenciando os fatores locais citados, e indiretamente, via a movimentação das grandes massas de ar que, além de afetar a circulação local [Damilano \(2006\)](#), possuem concentração distintas de poluentes, a depender das suas origens.

Analisando as diferentes variáveis meteorológicas, temos que, por exemplo, o vento, com suas três componentes, é responsável normalmente à noite pela turbulência (componente vertical do vento), e pela diluição e transporte das plumas de poluição. Com o aumento da altitude aumenta também a velocidade do vento e, portanto, aumenta a advecção dos poluentes. Na presença de sistemas de alta pressão ou de condições meteorológicas locais onde o vento é fraco, aumentos de concentração dos poluentes são favorecidos. As circulações de brisas são fenômenos meteorológicos de grande importância para a caracterização das condições de dispersão dos poluentes devido aos efeitos de recirculação que estão associados, um exemplo dessa situação é o trabalho de [Freitas \(2003\)](#), que trata sobre a influência das circulações locais na RMSP sobre a dispersão de poluentes e será abordado mais adiante com mais detalhes.

Em relação à umidade relativa, dependendo da região de estudo e do fenômeno meteorológico atuante em um período específico é possível encontrar alguma correlação. Trabalhos como o de [Martins et al. \(2000\)](#) encontraram que, para a Região Metropolitana de Porto Alegre, quando existem altos valores de umidade as concentrações de determinadas espécies poluidoras podem aumentar. No entanto é possível comprovar com os dados das estações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) que no município de São Paulo altos valores de concentrações de poluentes são registrados quando a região está sob a influência de um sistema de alta pressão com baixos valores de umidade associados ([COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB., 2020](#)).

Outra variável que tem grande importância é a radiação solar, da sua intensidade depende a formação de oxidantes na atmosfera que formam parte dos poluentes secundários. Especialmente o O_3 é formado na atmosfera por reações fotoquímicas que dependem da intensidade da radiação solar. Em geral, as concentrações de ozônio aumentarão quando o fluxo de raios ultravioleta for máximo, o que ocorre em cenários meteorológicos com poucas nuvens, quando no volume de ar em que os precursores ($COV's$ e NO_x) são misturados estes estejam presentes na razão certa e também quando o transporte seja limitado ([RYAN et al., 1999](#)).

A temperatura também constitui uma variável de interesse no estudo da dispersão atmosférica de poluentes. Altas temperaturas favorecem movimentos verticais ascendentes mais pronunciados (convecção), gerando um eficiente transporte dos poluentes localizados dos níveis mais baixos para os níveis mais elevados. Por outro lado, temperaturas mais baixas não favorecem movimentos verticais termicamente induzidos, o que permite a manutenção de poluentes atmosféricos em níveis mais baixos ([DAMILANO, 2006](#)). [Seinfeld \(1986\)](#) demonstrou que as emissões de hidrocarbonetos biogênicos e as emissões evaporativas de $COV's$ aumentam com a temperatura.

A estabilidade atmosférica é quem determina a dispersão do poluente verticalmente. Um fenômeno que causa aumento considerável das concentrações de poluentes é a inversão térmica, pois, a capacidade de dispersão fica bem limitada. A inversão térmica consiste em uma camada onde a temperatura aumenta com a altitude, contribuindo assim com o processo de estabilidade atmosférica dificultando a ascensão de parcelas de ar abaixo, dificultando a dispersão dos poluentes presentes.

Analisando os sistemas sinóticos fundamentais, como os sistemas de alta e baixa pressão e os sistemas frontais, sabe-se que de forma geral em áreas sob domínio de centros de altas pressões predomina a estabilidade e, conseqüentemente, pouca mistura vertical e, portanto, fraca dispersão dos poluentes. Na presença de sistemas de baixa pressão ocorrem condições de instabilidade e de intenso movimento vertical favorecendo a dispersão dos poluentes. A ação das frentes depende da intensidade das mesmas, mas em geral contribuem favoravelmente com a dispersão dos contaminantes dado a velocidade e distribuição dos ventos (DAMILANO, 2006).

2.1.3 Material Particulado: principais características.

Entre os poluentes, o Material Particulado é um elemento de especial interesse da presente pesquisa, ele pode ser caracterizado como uma mistura complexa de partículas sólidas e\ou líquidas com diâmetros reduzidos, cujas características tamanho, morfologia, composição química e propriedades físicas variam consideravelmente. Vasconcellos (1996) define o material particulado em suspensão como sendo qualquer substância, exceto água pura, que existe no estado sólido ou líquido na atmosfera, que, sob condições normais, possui dimensões microscópicas a sub-microscópicas, mas maior do que as dimensões moleculares. Uma vez dispersas no ar, essas partículas são chamadas também de aerossóis.

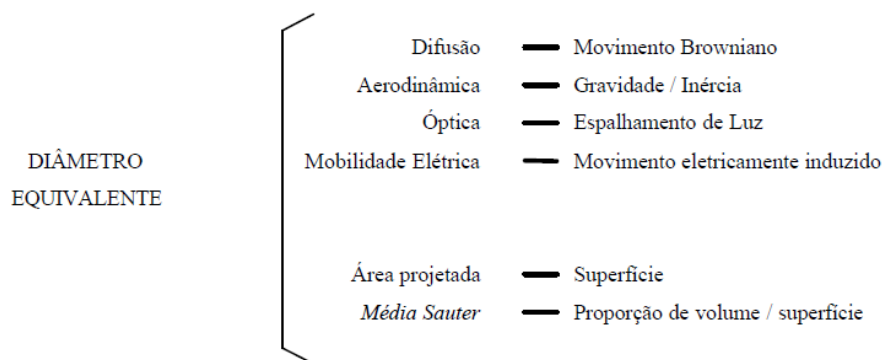
Segundo Raven et al. (1995), as principais fontes primárias de emissão de MP podem ser divididas em processos industriais, a queima de combustível (tanto em aquecedores e caldeiras) e o transporte; sendo que as duas primeiras fontes são responsáveis, de forma geral, por mais de 2\3 das emissões totais. O MP pode ser gerado também por fontes naturais como erupções vulcânicas, ação do vento sob os oceanos e pela ressuspensão de poeira do solo, especialmente em áreas de deserto.

Uma classificação usada na literatura científica para referir-se ao MP, segundo o processo de formação, é a citada por Assunção (1998), na qual o MP é dividido em poeiras (cuja formação vem geralmente de processos de desintegração mecânica), fumos (formados por condensação ou sublimação de substâncias gasosas originadas de vaporização ou sublimação de sólidos), fumaça (partículas principalmente sólidas formadas na queima de combustíveis fósseis, material asfáltico ou madeira) e névoas (partículas líquidas produzidas por condensação ou por dispersão de um líquido (atomização)).

O tamanho dos aerossóis é uma das suas características mais importantes, pois, exerce influência sobre vários processos atmosféricos como a interação com a radiação solar, formação de nuvens, tempo de vida do MP na atmosfera, seu transporte e a deposição das partículas. Partículas comportam-se distintamente em diferentes faixas de tamanho, sendo também regidas por diferentes leis físicas (WILLEKE; BARON, 1993). Definir o tamanho das partículas é uma tarefa complexa, por isso existem várias definições para esse aspecto. Frequentemente são definidas apenas aquelas partículas pertencentes a faixas de tamanho que podem ser medidas ou calculadas.

Um termo utilizado comumente para classificar o tamanho do MP é o diâmetro equivalente, este é definido como sendo o diâmetro de uma esfera que possua o mesmo valor para uma dada propriedade física específica da partícula irregular que esteja sendo medida. Por exemplo, quando o movimento é a propriedade física considerada, o diâmetro de mobilidade equivalente é o diâmetro de uma esfera que tem a mesma mobilidade da partícula em questão. É fácil entender então que uma partícula tem diferentes diâmetros equivalentes, estes variam dependendo da propriedade física avaliada. Alguns exemplos de correlação existente para definições de diâmetros equivalentes entre as propriedades e o comportamento das partículas podem ser observados na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Referências para definições de diâmetro equivalente em função das propriedades e do comportamento das partículas.

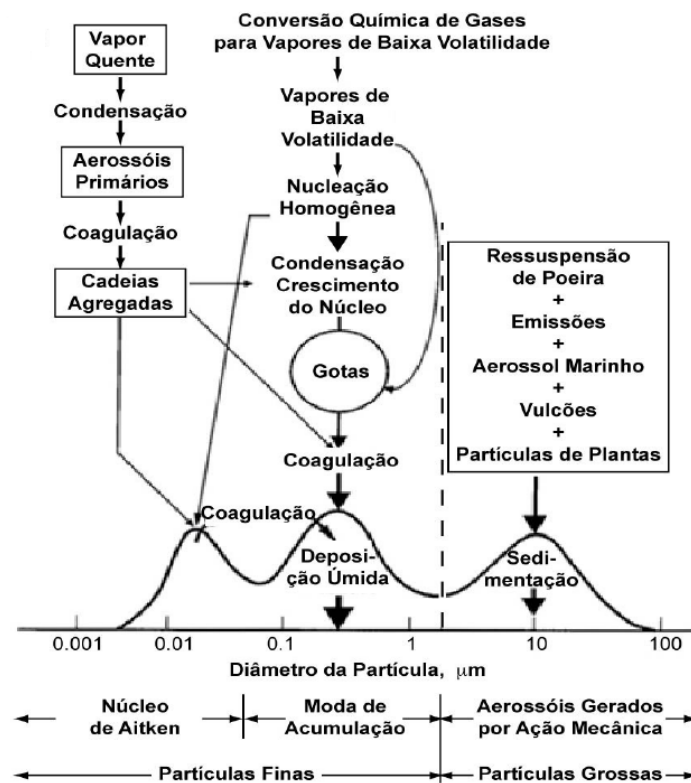


Fonte: Willeke e Baron (1993).

As partículas geralmente variam de alguns nanômetros (nm) até dezenas de micrômetros (μm). Pacyna (1995) apresenta uma classificação do MP onde é dividido em frações denominadas de moda fina (MP2,5) e moda grossa (MP10). Não há uma clara definição para a faixa de abrangência do tamanho desses termos, no entanto, o diâmetro limite para separar as partículas finas das grossas é geralmente $2,5 \mu\text{m}$.

A moda fina, por sua vez, é subdividida em 3 faixas de tamanho: as modas de nucleação (diâmetro entre $0,001$ e $0,02 \mu\text{m}$), de Aitken (diâmetro entre $0,020$ e $0,1 \mu\text{m}$) e de acumulação (diâmetro entre $0,1$ e $2 \mu\text{m}$). As partículas de moda grossa são mais suscetíveis à força gravitacional do que as partículas sub-micrométricas. Na Figura 2.3 são apresentados a distribuição de tamanho típica das partículas de aerossóis e alguns dos processos físico-químicos envolvidos tanto na geração quanto na remoção dessas partículas.

Figura 2.3 - Esquema idealizado da distribuição multi-modal de tamanho de partículas de aerossol. Principais faixas de tamanho e alguns processos físico-químicos mais relevantes na remoção e formação do material particulado.



Fonte: Adaptado de Seinfeld e Pandis (1998).

Como regra geral, a maior parte das partículas da fração fina é originada das atividades antropogênicas, como os processos de queima de combustíveis fósseis. A fração grossa resulta, em sua maioria, de processos mecânicos como a ressuspensão de poeira do solo e de partículas marinhas, sendo predominantemente de origem natural (WILLEKE; BARON, 1993).

Outros termos que são encontrados na literatura e estão associados às partículas inaláveis (MP10T) e partículas inaláveis finas (a moda fina MP2,5), que é como será utilizado em esta pesquisa de aqui em diante. A fração MP2,5 é definida como a quantidade em massa das partículas coletadas por um amostrador com um orifício de entrada com eficiência de captura de 50 % para partículas com 2,5 μm de diâmetro aerodinâmico. Esse diâmetro aerodinâmico é o diâmetro de uma esfera de densidade unitária ($1\text{g}/\text{cm}^3$) que tem a mesma velocidade terminal de sedimentação da partícula em estudo (WILLEKE; BARON, 1993). Já a fração MP10T é definida como a quantidade em massa das partículas coletadas por um amostrador cujo orifício de entrada possui corte de 50% de eficiência para partículas com 10 μm de diâmetro aerodinâmico.

A distribuição de tamanho de partículas de aerossóis descreve como a concentração varia em função do diâmetro, sendo essa concentração expressa em número de partículas por centímetros cúbicos (cm^3) ou a massa de soluto por unidade de volume de uma solução a uma dada temperatura (concentração mássica). A função matemática que melhor se ajusta às medidas de distribuição de partículas de aerossóis atmosféricos é a distribuição lognormal, ou por uma soma de distribuições, uma para cada moda (SEINFELD; PANDIS, 1998). Por exemplo, uma distribuição de partículas da moda fina seria dada por:

$$\frac{dN_{cn}(D)}{d\log D} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{N_{cn,i}}{\sqrt{2\pi} \log \sigma_{g,i}} \exp \left[- \left(\frac{\log D - \log D_{g,i}}{\sqrt{2} \log \sigma_{g,i}} \right)^2 \right] \right)$$

Onde $N_{cn,i}$ é a concentração total de partículas, $\sigma_{g,i}$ é o desvio padrão geométrico e $D_{g,i}$ o diâmetro geométrico médio com o índice $i=1,2,3$ representando cada uma das 3 subdivisões (respectivamente nucleação, Aitken e de acumulação). A equação é independente da base do logaritmo.

Um dos principais componentes dos aerossóis atmosféricos é a água condensada, que pode representar metade do volume das partículas em cenários com umidade relativa superior a 80 %, e ser a espécie dominante em ambientes com umidade relativa maior que 90 % (KREIDENWEIS, 2014). O aumento do tamanho dos aerossóis devido ao ganho de umidade depende de outra característica importante do MP, isto é, sua higroscopicidade, e que vai ser tratada nesta pesquisa. Essa característica depende da composição química da população de aerossóis, sendo conhecido que aerossóis mais higroscópicos têm maior tendência a funcionarem como núcleos de condensação de nuvens (NCN), isto é, partículas que podem ativar a formação de gotículas de nuvens na presença de supersaturação de vapor de água. Por tanto, o estudo da higroscopicidade dos aerossóis é fundamental para entender os efeitos destes nas propriedades microfísicas das nuvens e, conseqüentemente, também no balanço radiativo na atmosfera.

2.1.3.1 Influência do material particulado no balanço radiativo e na formação de nuvens.

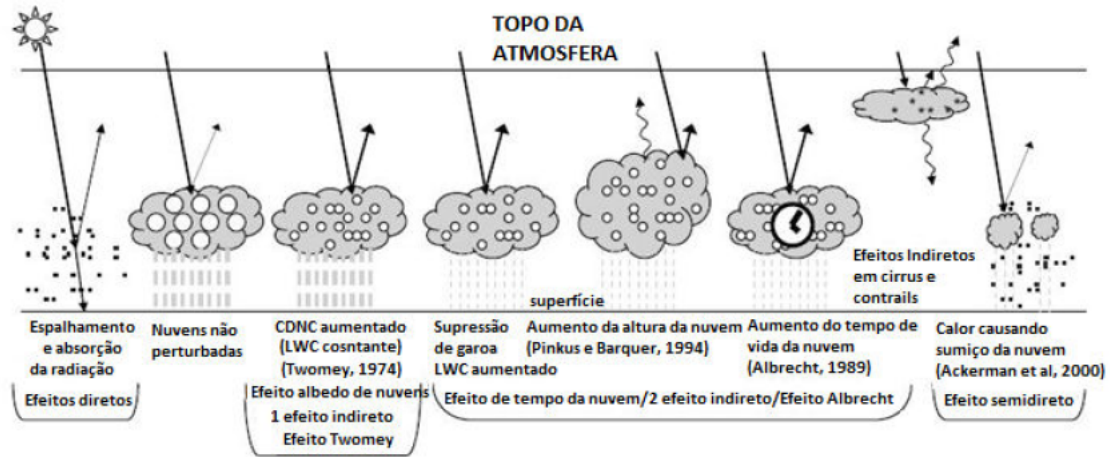
Existem três elementos principais que modulam a energia solar que atinge a superfície e a que é absorvida pela atmosfera, são estes: as moléculas dos gases, as nuvens e os aerossóis, este último é objeto de estudo nesta pesquisa. Os efeitos radiativos dos aerossóis podem ser classificados como diretos, que se refere às propriedades que têm os aerossóis de espalhar e absorver radiação no espectro solar e terrestre, alterando o albedo terrestre, e o indireto, que se refere às modificações provocadas nas propriedades microfísicas das nuvens e com implicações para o balanço radiativo. Em relação com o efeito direto, se produz uma redução da energia na superfície, aumento da absorção da energia pela atmosfera (dependendo da capacidade de absorção dos aerossóis), e aumento da radiação refletida e emergente no topo da atmosfera

Os efeitos, em geral, dependem das características dos aerossóis como concentração, tamanho, composição química que influencia na higroscopicidade e também da distribuição vertical das partículas. Essas características são determinantes para as propriedades ópticas das partículas e, conseqüentemente, para os efeitos radiativos dos aerossóis. Por exemplo no caso do efeito radiativo direto, partículas de moda de acumulação (ver Figura 2.3) interagem mais eficientemente com a radiação solar, uma vez que nesta moda o tamanho das partículas é da mesma ordem do comprimento de onda da radiação solar incidente. Como a seção de choque das partículas decresce com o aumento do comprimento de onda, o impacto dos aerossóis da moda fina sobre a radiação de onda longa é menor (TWOMEY, 1977).

Em relação aos efeitos radiativos indiretos dos aerossóis, por atuarem como núcleos de condensação de nuvens e núcleos de gelo (NG), uma variação na sua concentração ou propriedades microfísicas poderá levar a impactos na concentração e tamanho de gotículas nas nuvens, o que influi na radiação líquida que chega na superfície e na que pode ser absorvida pela atmosfera. Na literatura científica, são tratados dois processos que em conjuntos constituem o efeito indireto dos aerossóis no balanço radiativo, o efeito de Twomey (TWOMEY, 1977) e o efeito no tempo de vida da nuvem (ALBRECHT, 1989). O primeiro se refere ao aumento na reflexão da radiação solar devido ao maior número de gotículas menores nas nuvens, induzido pelo aumento dos aerossóis como núcleos de condensação, isso sem provocar mudanças nas propriedades termodinâmicas macroscópicas das nuvens. Enquanto o efeito no tempo de vida da nuvem é resultado da menor eficiência de precipitação das nuvens com gotículas menores, o que significa maior tempo de vida e conseqüentemente na fração de cobertura de nuvens, afetando o balanço radiativo tanto no espectro de ondas curtas quanto no de ondas longas (DAGAN et al., 2015). Esses efeitos ainda não são quantificados de forma satisfatória, mas parecem exercer uma grande influência sobre o clima local, regional e planetário. Os modelos de previsão numérica do tempo (PNT) são as ferramentas mais utilizadas atualmente nos estudos vinculados a esse tema, no entanto ainda existem muitos desafios devido a inclusão de parametrizações que não têm se mostrado totalmente eficientes (KHAIN et al., 2015).

As partículas de aerossóis absorvedoras, em particular o caso do *black carbon*, também causam aquecimento local da atmosfera, que pode resultar em estabilização da camada limite e dissipação em larga escala das nuvens. Esse último efeito tem sido chamado de efeito semi-direto das partículas de aerossóis no balanço radiativo (MCFIGGANS et al., 2006). Na Figura 2.4 são representados os diversos mecanismos radiativos associados com os impactos das partículas de aerossóis.

Figura 2.4 - Representação dos diferentes mecanismos associados com os impactos das partículas de aerossóis no balanço radiativo, sendo elas relacionadas com os efeitos diretos, indiretos e semi-indiretos.



Fonte: Adaptado de Solomon et al. (2007)

Visto o efeito do material particulado no balanço de radiação e a sua relação com as propriedades microfísica das nuvens, como conteúdo de água e tamanho das gotículas, percebe-se a importância de entender melhor esse processo de interação entre nuvens e aerossóis. A forma com que as características das nuvens e os processos de precipitação respondem ao aumento na concentração de aerossóis associado às emissões antrópicas é um aspecto ainda incerto, e depende principalmente das propriedades dos aerossóis que atuam como NCN e NG. Para uma dada massa de material solúvel em particular, existe um valor crítico de supersaturação de vapor de água abaixo do qual a partícula existe em um estado estável e acima do qual a partícula espontaneamente cresce até se tornar uma gota. Por tanto, o número de partículas de aerossóis que pode se comportar como NCN depende da supersaturação. Com isso, temos que a higroscopicidade dos aerossóis tem um papel fundamental, pois determina a capacidade desses aerossóis de ganharem água e se tornarem gotas de nuvens. A concentração de NCN, por sua vez, é um aspecto importante neste processo, pode variar de 100 partículas/cm³ em regiões marinhas remotas a milhares por cm³ em áreas urbanas poluídas (SEINFELD; PANDIS, 1998), por exemplo, a RMSP.

O crescimento higroscópico, que depende de propriedades físicas e químicas das partículas, em regiões urbanas é muito difícil de determinar e existem poucas referências na literatura científica mundial em relação a esse aspecto. Um exemplo de pesquisa recente que aborda esse aspecto para a RMSP é a descrita por [Rodrigues \(2014\)](#), onde fez-se a avaliação da higroscopicidade de aerossóis utilizando a técnica *Light Detection and Ranging* (LIDAR)- Raman . No entanto, entre os resultados obtidos está a dificuldade de utilizar essa técnica pela necessidade de uma extensa coleta de dados e pelo fato de que ela funciona melhor para determinadas condições meteorológicas, que raramente estão presentes.

De forma geral, existem vários estudos (como os citados por [Dagan et al. \(2015\)](#)) sobre como as mudanças na quantidade e propriedades dos aerossóis afetam as características das nuvens convectivas quentes. Ainda não existe um consenso em relação a esse aspecto, por um lado alguns estudos ([KAUFMAN et al., 2005](#); [YUAN et al., 2011](#)) sugerem que o aumento na concentração de partículas de aerossóis resulta em evaporação mais eficiente, portanto em nuvens menos desenvolvidas, por outro lado estudos sugerem haver uma revigoração das nuvens. Um exemplo desse último caso é o estudo realizado pelo [Gonçalves et al. \(2015\)](#), onde se obteve maior precipitação com maior concentração de aerossóis, neste estudo foram utilizados dados de observações *in situ*. O próprio estudo do ([DAGAN et al., 2015](#)) revelou a existência de uma concentração ótima de partícula de aerossóis para a qual a nuvem atinge seu máximo em massa de água e a partir da qual a tendência no desenvolvimento se inverte, portanto, aumentar a concentração de aerossóis se traduz em supressão da nuvem.

[Koren et al. \(2012\)](#) encontraram que os processos de colisão-coalescência e de precipitação são impactados pelas mudanças da distribuição de tamanho das gotículas que, por sua vez, foram causadas pelas mudanças na concentração de partículas de aerossóis. Em nuvens com altas concentrações de aerossóis o início do processo de colisão-coalescência pode ser atrasado.

2.1.4 Poluição do ar em regiões urbanas.

A poluição do ar nas regiões urbanas é um problema antigo, vários episódios de extrema gravidade foram registrados ao longo da história, tais como: Vale Meuse, Bélgica, em 1929; Donora, Pensilvânia, em 1948; Seveso, Itália, em 1976; dentre outros (BRASSEUR, 1999). A revolução industrial, que iniciou na Grã Bretanha no século XVIII agravou consideravelmente a situação e atualmente é um tema que preocupa pelas suas dimensões. O mais clássico e mais grave dos episódios dos efeitos dos poluentes do ar foi o ocorrido em Londres, na Grã Bretanha, no inverno do ano 1952. Um episódio de inversão térmica impediu a dispersão de poluentes gerados pelas indústrias e pelos aquecedores domiciliares que utilizavam carvão como combustível, como conseqüências milhares de pessoas perderam a vida e o governo britânico se conscientizou da importância do monitoramento da qualidade do ar.

Existem vários fatores que determinam as características e os efeitos da poluição do ar nas regiões urbanas, como exemplo, pode-se citar:

- Concentração e a composição dos contaminantes: as variações na concentração dependem, como já se apresentou anteriormente, não só da emissão, mas também das condições meteorológicas e do relevo. Além disso, o tipo de contaminante é muito importante por seus diversos efeitos, os períodos de exposição variam com o tipo e concentração do contaminante.
- O horário: as concentrações variam nas diferentes horas do dia devido às condições meteorológicas locais ou por variações nas emissões, sejam por horários de pico no transporte ou na produção industrial. Para um fluxo de emissão constante, a concentração de poluentes no nível do solo depende das condições meteorológicas, em particular da chuva e dos ventos.

Cada fonte contribui de forma diferente com a emissão total de poluentes numa determinada região urbana, sendo necessário realizar uma complexa análise sobre diversos fatores para se ter uma estimativa da contribuição individual. Para uma das fontes mais importantes em ambientes urbanos, os veículos automotores (ver Item 2.1.4.1), é necessário conhecer, entre outros aspectos, o tipo e a idade da frota veicular, o comportamento do tráfego e a configuração das vias.

As características particulares das regiões urbanas, como fatores físicos, também estão relacionadas com a dispersão dos poluentes. A própria superfície urbana afeta os fluxos de calor sensível, calor latente e de *momentum*, além de afetar a convergência em superfície e a altura da CLP e suas características. Estas mudanças causam um impacto sobre a dispersão de poluentes, iniciação de tempestades, propriedades ópticas da atmosfera e muitos outros processos físicos e químicos no ambiente urbano (MORRIS et al., 2001).

2.1.4.1 Emissão veicular de poluentes.

As emissões de veículos automotores, que fazem parte das fontes móveis como descrito anteriormente, podem ocorrer pelo escapamento (emissões diretas) ou podem também ser de natureza evaporativa do combustível. As emissões de escapamento decorrem da queima do combustível pelo motor e compreende um conjunto amplo de substâncias (material particulado, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio NO_x, hidrocarbonetos não-metano, aldeídos (RCHO) e metano (CH₄, o mais simples dos hidrocarbonetos). Já as emissões evaporativas são constituídas pelos hidrocarbonetos que evaporam do sistema de alimentação de combustível do veículo.

As emissões de veículos automotores são influenciadas por vários fatores, dentre os quais podemos destacar: tecnologia do motor, porte e tipo de uso do veículo, idade do veículo, projeto e materiais do sistema de alimentação de combustível, natureza e qualidade do combustível (pressão de vapor), além de fatores meteorológicos, nomeadamente pressão atmosférica e a temperatura ambiente (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT., 2011).

Por diferentes motivos, não é possível ter medidas experimentais de emissão para todas as unidades veiculares de uma determinada região, por isso, é necessário realizar estimativas do cálculo das emissões mediante emprego de metodologias auxiliares, entre os quais destacam os exemplos dos métodos *bottom-up* (de baixo pra cima) e *top-down* (de cima pra baixo). O método *bottom-up* fundamenta a obtenção das emissões totais para uma região via soma das emissões de todas as atividades individuais. Esta aproximação requer o uso de informação detalhada de cada uma das fontes de emissão individuais, o que significa trabalhar com uma grande precisão e um extenso conjunto de dados (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA., 1999). *Bottom-up* é tipicamente usada para estimativa de emissões de fontes pontuais, mas pode também ser usada para fontes que ocupam áreas específicas, desde que se tenha acesso às informações específicas.

A contraparte desse primeiro método é o *top-down* (de cima pra baixo), ela se baseia no cálculo das emissões totais e logo na realização de uma distribuição espacial das mesmas utilizando padrões de distribuição. Essa metodologia apresenta uma precisão global satisfatória se são usados os parâmetros adequados das atividades de estudo (NOCEDA, 2013). A vantagem desse método é a facilidade de se obter os dados necessários iniciais para fazer a distribuição das emissões. Por outro lado, pode-se caracterizar uma desvantagem em termos de exatidão nos resultados gerados.

A aplicação correta dos métodos assegurará que o cálculo realizado para obter os inventários de emissão é a melhor aproximação possível dos valores de emissão reais e, também, um processo transparente, consistente e comparável (NOCEDA, 2013). Os inventários de emissões veicular são sempre projetos dinâmicos que podem ser amplificados e melhorados.

Muitos inventários de emissões veiculares são realizados cada ano no mundo todo. Diferentes organizações estaduais e federais fazem também esses inventários de emissões, um exemplo é a série de relatórios feita pela Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo e a Companhia Ambiental do estado de São Paulo (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB., 2020). Na Tabela 2.1 são mostrados os últimos quatro resultados divulgados referentes à emissão veicular para a RMSP, eles correspondem aos anos entre 2016 e 2019. Como outros exemplos temos o inventario de emissões veiculares para o estado de Rio de Janeiro (AGOSTO et al., 2011), o primeiro inventário de emissões atmosféricas das fontes móveis do Rio Grande do Sul (RS) (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER - FEPAM., 2010), os inventários de emissões veiculares para a Região Metropolitana de Porto Alegre (CHOVERT; ALONSO, 2017), o obtido para a cidade de Pelotas/RS (SILVA, 2014), e o inventario nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT., 2011). No caso dos exemplos citados a metodologia utilizada foi a *bottom-up*.

Tabela 2.1 - Estimativa de emissão veicular para a RMSP nos anos entre 2016 e 2018 (1000 ton/ano).

Total Emissão Veicular na RMSP/espécies	CO	HC	NO _x	MP	SO _x
Ano de 2015 (1000 ton/ano)	127,16	29,03	54,35	1,53	1,13
Ano de 2016 (1000 ton/ano)	129,03	29,84	52,11	1,43	1,14
Ano de 2017 (1000 ton/ano)	124,99	28,29	46,25	1,24	1,12
Ano de 2018 (1000 ton/ano)	115,94	25,67	43,44	1,13	1,03

Fonte: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2017), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2018), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2019), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2020).

Um dos últimos trabalhos desenvolvidos no Brasil para estimar as emissões veiculares foi o realizado pelo pesquisador Espinosa (2017). Ele utilizou a metodologia *bottom-up* para estimar cenários de emissão em diferentes regiões metropolitanas do leste do estado de São Paulo e estudaram o impacto destes cenários na qualidade do ar nas regiões em estudo. Foram utilizadas diferentes fontes de dados, entre elas as simulações de tráfego e contagem de veículos da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) e da Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes assim como registros de deslocamentos de veículos através do GPS para a distribuição espaço-temporal do fluxo veicular. Como resultado mais significativo se obteve que as emissões simuladas para a RMSP foram maiores que as estimadas pela CETESB para todos os poluentes.

2.1.4.2 Emissões na RMSP e características dos poluentes.

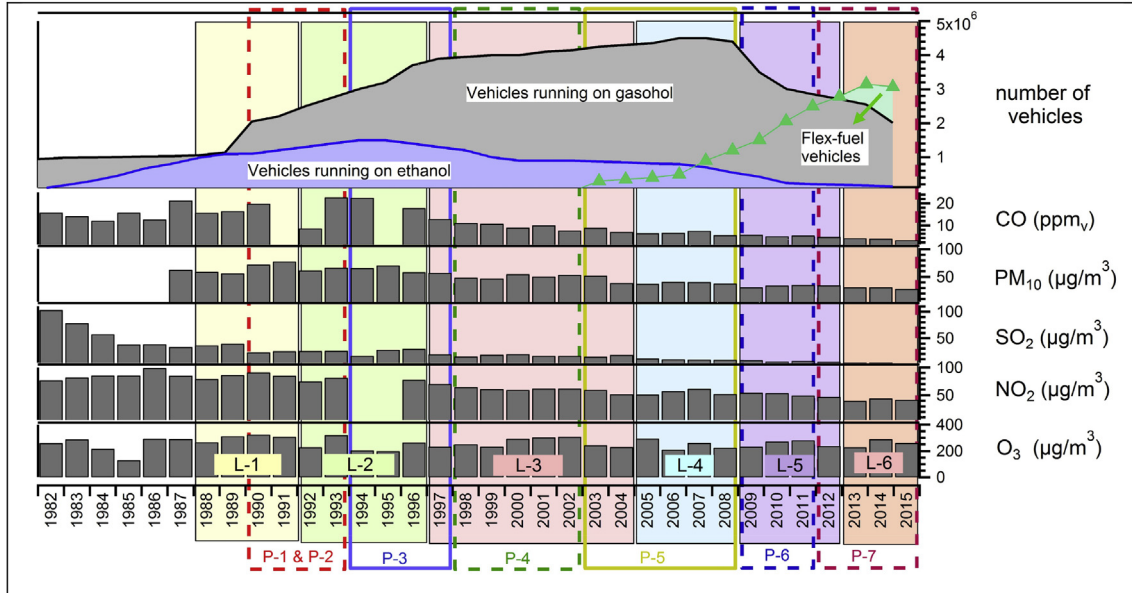
Com uma área urbanizada bem extensa, diferentes tipos de indústria e uma numerosa frota veicular circulante, a Região Metropolitana de São Paulo apresenta características degradadas de qualidade do ar pela poluição associada a esses fatores. Uma descrição mais detalhada sobre a RMSP, área de estudo da presente pesquisa, será abordada no próximo capítulo.

A instituição encarregada de monitorar e realizar ações para o controle da poluição do ar no estado de São Paulo é a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Possui mais de 30 estações de medição de variáveis químicas e meteorológicas espalhadas pela RMSP com um banco de dados que contém informação desde a década de oitenta, do século passado, o que tem permitido a realização de diversos estudos para definir os aspectos específicos da poluição na região.

Um dos estudos relevantes é o realizado por [Andrade et al. \(2017\)](#), onde é abordada a evolução da qualidade do ar na RMSP nos últimos 30 anos e discutindo-se perspectivas futuras dessa poluição. Outra pesquisa relacionada com o tema é a descrita por [Pacheco et al. \(2017\)](#) que apresentam uma revisão sobre as concentrações e emissões de material particulado em três grandes regiões urbanas de Brasil, entre elas a RMSP.

Um elemento importante para compreender as características e a evolução da emissão e da concentração dos poluentes na atmosfera da RMSP foi o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) (<https://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>). Este programa tem como objetivo regulamentar as emissões atmosféricas de origem veicular e foi criado pelo governo federal em 06 de maio de 1986 quando o CONAMA publicou sua Resolução nº. 18, que estabeleceu uma política de controle de emissões de longo prazo. Nele se especificam várias etapas ou fases que estabelecem limites de emissão para os diferentes tipos de veículos. Esse programa e outros como o Programa Nacional do etanol (conhecido como Proálcool), têm contribuído para a redução das emissões e concentrações de poluentes na RMSP como é observado na Figura 2.5 pertencente ao trabalho de [Andrade et al. \(2017\)](#).

Figura 2.5 - Evolução dos valores médios das concentrações de CO, MP10T, O₃, SO₂ e NO₂ medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar CETESB na RMSP, número de veículos por categoria (gasolina, etanol e diesel) e o ano de implementação do PROCONVE).



Fonte: Andrade et al. (2017).

Observa-se também, na Figura 2.5, que as concentrações registradas de CO e SO₂, relacionadas principalmente com os veículos automotores movidos a gasolina, diminuíram de forma marcante no período analisado. As concentrações de NO_x, MP, apesar de terem registrado anos com tendência de aumento, diminuíram de forma geral no período. Já as concentrações de O₃ troposférico não apresentaram tendência sistemática, pois ele é um gás secundário e a sua formação depende, entre outros fatores, da razão entre as concentrações dos seus precursores, os NO_x e os HC.

Na Tabela 2.2 são apresentados os dados das emissões totais para a RMSP nos anos entre 2014 e 2018, último divulgado, segundo dados disponibilizados pela CETESB (<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>). Desses totais, ao analisar todos os anos, os veículos são responsáveis por aproximadamente 97 % das emissões de CO, entre 73 % e 76 % dos HC, entre 62 % e 68 % dos NO_x, entre 15 % e 17 % dos SO_x e entre 30 % e 40 % do MP. Tem se observado uma diminuição gradual da emissão para as espécies analisadas no decorrer dos anos, exceto em alguns casos onde se evidencia um ligeiro aumento de um ano para o outro, exemplo o MP em 2015 quando comparado com 2014. Vale destacar que nesses dados da CETESB os dados de emissão industrial não são atualizados desde o ano de 2008.

Tabela 2.2 - Valores de emissões totais (veiculares mais industriais) das principais espécies poluentes na RMSP para os anos entre 2014 e 2018 estimados pela CETESB (1000 ton/ano).

Total geral de emissões na RMSP espécies	CO	HC	NO_x	MP	SO_x
Ano de 2014 (1000 ton/ano)	167,08	44,10	80,43	5,05	7,15
Ano de 2015 (1000 ton/ano)	131,34	38,31	80,45	5,10	6,72
Ano de 2016 (1000 ton/ano)	133,21	39,12	78,21	5	6,73
Ano de 2017 (1000 ton/ano)	129,17	37,57	72,35	4,81	6,71
Ano de 2018 (1000 ton/ano)	120,12	34,95	69,54	4,70	6,62

Fonte: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2016), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2017), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2018), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2019), COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2020).

2.1.5 Estudos sobre o impacto do Material Particulado na precipitação em regiões urbanas.

Como foi apresentado na introdução deste trabalho e posteriormente no Item 2.1.3.1, a presença de material particulado na atmosfera influi diretamente na formação das nuvens e, conseqüentemente, nos processos de precipitação. Dada a ausência de um consenso sobre a magnitude e o sinal da influência exercida pelo MP, especialmente no caso do particulado antrópico, é indiscutível que existe uma necessidade de entender melhor o papel do material particulado na meteorologia, especialmente na variável precipitação, para cada região específica. Isso contribuiria para a compreensão e previsão de sistemas meteorológicos que causam precipitação, seja esta intensa ou persistente. Nos últimos anos vários estudos têm sido realizados para compreender como as variações nas concentrações dos aerossóis impactam nos regimes de precipitação, especialmente em regiões urbanas espalhadas pelo planeta. A seguir é apresentado um resumo de alguns desses estudos e os principais resultados obtidos.

[Zhao et al. \(2006\)](#) analisaram dados de precipitação nas estações, dados de concentrações de aerossóis calculados utilizando o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e dados de sondagens no centro-leste da China. Obtiveram como resultado que a precipitação diminuía na região significativamente quando consideram um período anterior de 40 anos, e concluíram que essa redução estava fortemente relacionada com o aumento das concentrações de aerossóis. A conclusão do trabalho manifesta a relação entre aumento de aerossóis e diferenças nos processos radiativos na superfície que ao mesmo tempo favorecem a estabilidade da atmosfera e a diminuição da precipitação.

[Lee et al. \(2018\)](#) estudaram o papel dos aerossóis na ocorrência de chuvas intensas em Seul (Coreia do Sul) a partir de simulações produzidas com um sistema de modelagem com resolução compatível para resolver numericamente as nuvens. Foi observado que a variabilidade na distribuição espacial dos aerossóis gera uma heterogeneidade na distribuição espacial do esfriamento por evaporação, isso provoca um forte campo de convergência em superfície ao qual se associa a ocorrência de chuvas intensas. A importância deste estudo está principalmente no fato dos resultados obtidos demonstrarem que a variabilidade espacial dos aerossóis, e não só as diferenças nas concentrações ao longo do tempo, tem um papel importante no desenvolvimento de tempestades severas.

Zhou et al. (2018) encontraram que a variação diurna das chuvas intensas na região de Beijing-Tianjin-Hebei dependia em parte das características dos aerossóis. Nesse estudo se utilizaram produtos satelitais de precipitação e também dados das estações meteorológicas e químicas em superfície durante o período de 2002-2012. Foi observado que nos dias com maior concentração de aerossóis os eventos de precipitação intensa começaram 1 hora antes e tiveram uma duração maior. Também observaram que a variabilidade da umidade determina a forma em que o aerossol impacta na parte superior da nuvem. Entretanto, este trabalho deixa claro a necessidade de se realizar simulações para entender melhor esses processos de interação e a forma em que os diferentes tipos de aerossóis influem nos eventos de precipitação.

Zhang et al. (2020), utilizando dados observacionais e simulações com modelos, demonstraram que o aumento dos aerossóis antropogênicos no Sul da China contribuiu com uma diminuição entre 21 % e 32 % na ocorrência de sistemas convectivos de mesoescala. Metade dessa redução na ocorrência desses sistemas foi devido ao componente espalhamento do efeito radiativo direto dos aerossóis, e ao efeito indireto, via aumento da reflectância da nuvem líquida, que contribuíram para estabilização da atmosfera. A outra metade foi devido às respostas microfísicas e dinâmicas dos sistemas convectivos de mesoescala aos aerossóis.

Liu et al. (2020) estudaram um caso de chuva intensa que quebrou o recorde de acumulado, duração e extensão (área afetada) na província de Guangdong na China. Utilizaram um modelo acoplado (ver Item 2.3) de meteorologia e química da atmosfera. Aumentos de até 33 mm foram atribuídos à interação entre as nuvens e os aerossóis. Eles fazem uma discriminação entre os aerossóis locais e os de fontes remotas que ficam mais tempo na atmosfera depois do começo da precipitação por estarem a alturas maiores. No entanto, com as simulações observaram que os padrões espaciais de resposta da precipitação a concentrações dos aerossóis locais e remotos são semelhantes. Em relação à intensidade, os aerossóis de origem remota contribuem com o dobro da precipitação quando comparados com os locais. Ao aumentar em 10 vezes as emissões dos aerossóis eles obtiveram uma diminuição de aproximadamente 1 mm em média em relação com a simulação controle. Quando utilizaram uma atmosfera limpa, a precipitação aumentou em média 1,4 mm em relação à simulação controle. A importância deste artigo está na hipótese de que aerossóis remotos podem superar a influência dos locais dependendo da configuração das regiões urbanas.

Rodriguez et al. (2010) analisaram a influência da poluição no desenvolvimento das tempestades e pancadas de chuva no verão para a cidade de São Paulo. No período de estudo foram classificados 241 dias com tempestades e 364 dias sem tempestades. Os dados de profundidade óptica dos aerossóis utilizados foram do AERONET (*Aerosol Robotic Network*). Os resultados revelaram que não há diferenças significativas no tamanho e na concentração dos aerossóis nos dias com tempestade e nos dias sem tempestades. As medidas da profundidade ópticas dos aerossóis para os dias com tempestade e os dias sem tempestades são muito semelhantes. Nos dias com tempestade, observou-se concentrações de aerossóis ligeiramente maiores, o que pode ser resultado da convergência de massa imposto pelo padrão sinótico. Além disso, foi verificado que tanto os dias com como os dias sem tempestades apresentaram altas concentrações de partículas finas que são mais susceptíveis de serem higroscópicas. Visto que o mês de análise foi no verão, o papel dos aerossóis pode não ser tão determinante devido à forte convergência de massa associada à convecção. Porém, o mesmo não se pode afirmar em relação às outras estações do ano, quando as concentrações dos aerossóis tendem a aumentar e a convecção não é tão intensa.

Artigos que estudam a influência em conjunto da urbanização e dos aerossóis na precipitação nas regiões urbanas:

Fan et al. (2020) estudaram o efeito conjunto da superfície urbana e dos aerossóis nas modificações da precipitação induzida pela brisa marítima em Houston (Estados Unidos de América). Utilizaram o modelo WRF/Chem (*Chemical Weather Research and Forecasting Model*) para realizar as simulações acopladas ao modelo urbano *Building Effect Parameterization* (BEM-BEP) e utilizando microfísica espectral (ver Item 2.3.1.2). Obtiveram como resultado que o efeito combinado da superfície urbana e os aerossóis antropogênicos aumentam a intensidade da tempestade e da precipitação, sendo que o efeito do aerossol é mais significativo. A superfície urbana acelerou a transição da fase quente da nuvem à fase mista provocando uma antecipação da precipitação. Segundo os autores o efeito do aerossol começa nesse momento, em que a nuvem está na fase mista, pois acelerou o desenvolvimento da nuvem até a fase de convecção profunda.

Zhong et al. (2017) utilizaram o modelo WRF/Chem acoplado a um modelo de dossel urbano para estudar os efeitos combinados da superfície e dos aerossóis sobre o clima na região do delta do Rio Yangtze. Obtiveram como resultado que a urbanização, ao induzir a formação da ilha de calor, favorece o aumento da frequência de eventos de precipitação extrema de verão sobre a região ao favorecer a convergência que, na sequência, dá lugar à convecção profunda. Em contraste, os aerossóis favorecem o resfriamento da superfície e o aquecimento da atmosfera superior, o que contribui para a estabilidade e, portanto, suprime a convecção. Eles concluem que a magnitude dos efeitos combinados da superfície urbana e dos aerossóis dependem do sistema sinótico, no caso do domínio de um sistema de grande escala os efeitos destes fatores são fracos. Portanto, as mudanças de precipitação devido aos efeitos da urbanização podem se compensar em diferentes condições sinóticas, resultando em pequenas mudanças na precipitação média em escalas de tempo mais longas.

2.2 Influência das características da superfície urbana na atmosfera. Ilha de calor.

O aumento acelerado da população nas regiões urbanas é um fenômeno que começou no século XX e que deve tomar maiores dimensões nas próximas décadas. Esse aumento faz com que as modificações antropogênicas sejam mais acentuadas e cada vez mais influentes sobre as características do ambiente que rodeia o espaço urbano. O elevado número de ruas asfaltadas, prédios, indústrias, veículos circulando, entre outros aspectos, são fatores decisivos que determinam e podem alterar o já complexo sistema do microclima urbano. Uma das manifestações mais importantes da influência da ação antrópica no clima nesta escala é a formação do fenômeno denominado de Ilha de Calor Urbano (ICU), pois ela interage de forma direta com muitos dos outros fatores mencionados anteriormente.

A ICU é o armazenamento calor característico das zonas urbanizadas, quando comparadas com as áreas rurais nos seus arredores (não-urbanizados) e, geralmente, refere-se ao aumento na temperatura do ar, mas pode igualmente referir-se ao aquecimento relativo da superfície e materiais sub-superficiais. Desse modo, a ilha de calor é um fenômeno que pode caracterizar dois meios diferentes, um é a superfície das cidades e outro o ar que se encontra sobre ela, isso através das diferenças de temperaturas em lugares distintos de ambos meios. Muitos pesquisadores das ciências atmosféricas assumem o termo ICU como sendo unicamente vinculado com a atmosfera, mas como já foi explicado, existe também a ICU da superfície, sendo que ambos tipos interagem constantemente.

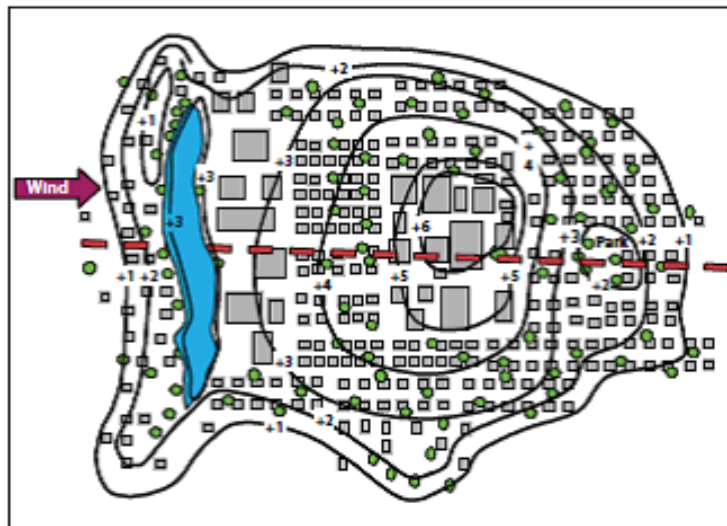
A Ilha de Calor Urbano Superficial (ICUS) está presente tanto no dia como na noite, sendo que na maioria das cidades a maior intensidade é alcançada durante o horário diurno. Análises de vários estudos sobre este fenômeno (MONTAVEZ et al., 2000; ELIASSON; SVENSSON, 2003; AKBARI et al., 2008), encontraram que a média da diferença entre a temperatura da superfície nas cidades e nas regiões rurais durante o dia oscila em torno dos 10 a 15 °C, no período noturno esses valores oscilam entre 5 e 10 °C. A intensidade da ICUS também depende da estação do ano, isso pelas variações na quantidade de radiação solar e os sistemas meteorológicos de escala maior. Para a identificação e o estudo da ICUS existem vários métodos mas a principal ferramenta observacional é o sensoriamento remoto que permite estimar a temperatura na superfície e produzir imagens termais, a ICUS é uma medida indireta da temperatura e exige a correção das propriedades da superfície radiativa que influenciam a emissão e reflexão da radiação de comprimentos de ondas espectrais detectadas pelo sensor. Simulações numérica e modelos empíricos para estimar as temperaturas também são empregados.

O segundo tipo de ICU, de maior importância para os meteorologistas e objeto de estudo da presente pesquisa, é a Ilha de Calor Urbana Atmosférica (ICUA). Esta se caracteriza também pela diferença de temperatura entre as regiões urbanas e suburbanas ou rurais, mas neste caso se refere à temperatura do ar sobre estas áreas.

Alguns autores dividem a ICUA em dois subtipos: a de copa e a da camada fronteira. O primeiro refere-se a aquela região específica bem perto da superfície que vai desde o solo até a copa das árvores e telhados. O segundo para se referir à ICUA que é observada na região desde os telhados e copas das árvores até onde os centros urbanos não influem mais na atmosfera. No entanto, neste documento será tratada a ICUA como uma só, igual ao que se faz na maioria dos estudos sobre o tema. Esta tem características distintas da ICUS, no geral, a ICUA apresenta menor intensidade durante o dia comparado com o período noturno. Nos meses de inverno e primavera é que se alcançam as maiores diferenças de temperatura do ar entre as regiões em questão. Essas diferenças são menores quando comparadas com a ICUS, podendo chegar, em média, a 3 °C durante o dia e entre 3 e 6 °C durante a noite (AKBARI et al., 2008).

Para a identificação da ICUA, e seu estudo, utilizam-se mapas de isotermas e gráficos de temperaturas obtidos a partir das observações nas estações meteorológicas de superfície; o padrão espacial das isotermas tem usualmente um formato semelhante à configuração de uma ilha, por isso a denominação de Ilha de Calor, que mesmo sendo neste caso atmosférica passou a ser a denominação geral dada para esse fenômeno (Figura 2.6). A distribuição espacial das isotermas depende da configuração da área urbanizada, que se caracteriza por um elevado gradiente térmico no limite urbano-rural, seguida por uma ascensão gradual da temperatura em direção ao núcleo da cidade.

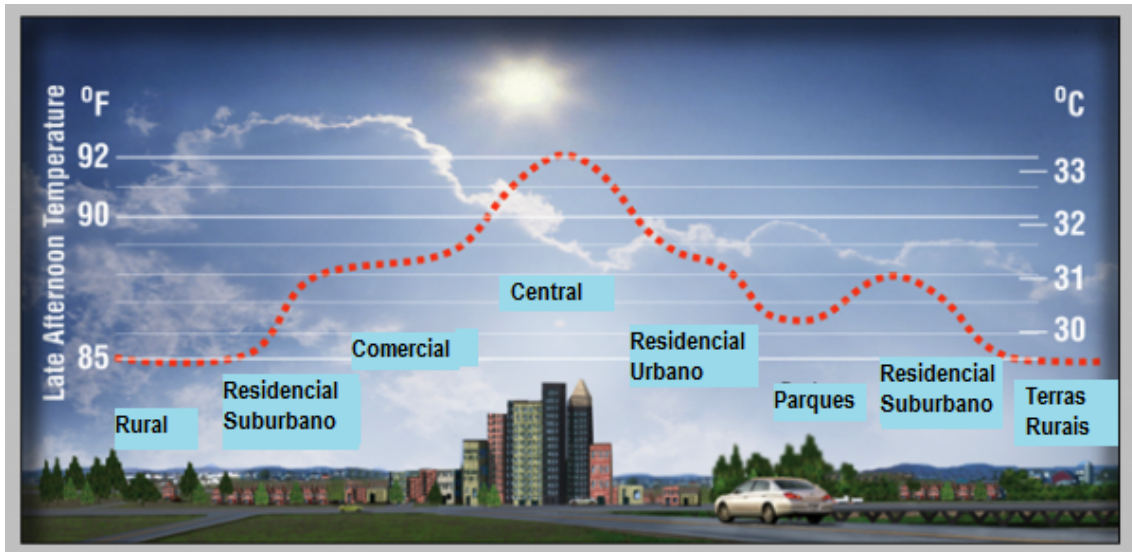
Figura 2.6 - Mapa conceitual com as isotérmicas que representa uma ilha de calor urbano atmosférica. O centro da figura, que é a área mais quente, é o chamado núcleo urbano.



Fonte: Akbari et al. (2008).

O padrão clássico da ICU, tanto de superfície como da atmosfera, apresenta um núcleo de máxima temperatura no centro da cidade ou na área central da cidade onde encontram-se os prédios de maior altura e o centro comercial (na Figura 2.7 pode ser observada essa estrutura). No entanto, outros padrões podem ser encontrados como, por exemplo, aqueles onde vários núcleos quentes são disseminados no perímetro das diferentes cidades, principalmente quando não se trata de grandes áreas metropolitanas e quando o uso de solo não é tão heterogêneo (AKBARI et al., 2008).

Figura 2.7 - Transecto da variação da temperatura para uma região urbana e áreas periféricas.



Fonte: *Heat Island Group – Lawrence Berkley National Laboratory* (2021)

Apresentada essa informação geral, é possível resumir então que as ICUs se caracterizam por três aspectos principais: forma, intensidade e localização do seu núcleo mais quente. Esses aspectos são distintos em cada cidade o que dificulta estabelecer um modelo conceitual único para as ICUs, pois, elas variam em função do momento do dia (variabilidade diurna, podendo ser detectados os períodos mais favoráveis para a manifestação da ICU, seja no horário de maior aquecimento diurno ou mesmo no momento de resfriamento noturno), e da época do ano (variabilidade sazonal, onde distintos sistemas atmosféricos atuam, e que determinam situações mais secas que geralmente são marcadas por ilhas de calor mais intensas, ou situações mais úmidas, geralmente evidenciadas por ilhas de calor mais amenas). Outros aspectos que influenciam a ICU são o tempo meteorológico, a localização geográfica das cidades, incluindo sua morfologia natural, como morros, corpos hídricos e áreas verdes, e as propriedades térmicas dos materiais que compõem a superfície urbana.

Diversos fatores contribuem para o desenvolvimento e intensificação das ICUs, exemplo a localização geográfica de cada região. Estes fatores tem maior ou menor importância dependendo da região em que se encontra a área urbana estudada. O primeiro fator a tratar é a diminuição das áreas vegetadas nas regiões urbanas, a vegetação proporciona sombra e, ao mesmo tempo, reduz a temperatura do ar pelo processo de evapotranspiração em que se libera água que, como será visto mais na frente, contribui para a diminuição da temperatura (AKBARI et al., 2008).

As propriedades dos materiais urbanos é outro fator importante, em particular o albedo, emissividade e capacidade térmica. Muitos materiais de construção, como o aço e a pedra, têm maior capacidade calorífica quando comparado com os materiais comumente encontrados nas regiões rurais e suburbanas, como resultado, as cidades são mais eficazes para armazenar a energia solar como calor dentro de sua infraestrutura. A impermeabilidade dos materiais das construções e da pavimentação também produzem ambiente seco e quente porque induzem a redução da evaporação. O albedo de muitos materiais presentes nas cidades, exemplo o asfalto, é menor quando comparado com áreas rurais e assim estes refletem menos e absorvem mais radiação (VENDRASCO et al., 2004; SANTAMOURIS et al., 2011).

A própria geometria urbana influencia as ICUs, as dimensões e o espaçamento entre as construções influenciam o regime de ventos, assim como a absorção de energia e a capacidade de emitir radiação para o espaço. Os estudos vinculados com este fator normalmente focam a atenção nos chamados cânions (vales) urbanos, definidos como as áreas entre edificações, telhados e ruas. Nos cânions urbanos se produz uma competição entre vários efeitos, de um lado as construções elevadas criam sombra que reduzem a temperatura na superfície e do ar adjacente, por outro, quando a luz do sol chega até a superfície do cânion, a energia é refletida e absorvida pelas paredes dos edifícios o que diminui mais ainda o albedo total da cidade e, conseqüentemente, se produz um aumento de temperatura. Os efeitos da geometria urbana nas ICU podem ser descritos utilizando o fator de visão do céu (FVC), que é a área visível do céu desde um ponto qualquer na superfície (ERIKSEN, 1978).

Outro fator de importância é o calor antropogênico, que pode ser produzido por uma variedade de fontes e é estimado pela quantidade de energia total usada na calefação e refrigeração, aparelhos em funcionamentos, transporte e processos industriais. Vinculado a esse fator está outro que ainda precisa ser estudado mais profundamente, o aumento das concentrações de poluentes na atmosfera das áreas urbanas e que altera o ciclo de transmissão da energia (AKBARI et al., 2008).

Todos esses fatores expostos estão relacionados com o balanço de energia na superfície das áreas urbanas, e que faz que em determinado momento do dia as diferenças de temperaturas entre o núcleo urbano e as áreas rurais e suburbanas circundantes, seja de superfície ou da atmosfera, apresentem resultados positivos.

O processo de evapotranspiração descrito anteriormente atua na transferência de calor, o sistema de drenagem (bueiros) rapidamente remove a maior parte da água das chuvas nas cidades, de modo que apenas uma pequena parcela da radiação absorvida é utilizada para evaporação (calor latente). A maior parte dessa radiação é utilizada para aquecer a superfície terrestre e o ar diretamente (calor sensível). O calor sensível também desempenha um papel importante, quando existe diferença de temperatura entre a superfície e o ar, a primeira aquece o segundo e esse calor sensível é transportado pela convecção o que provoca a ICUA (OKE, 1982).

Para realizar estudos que caracterizam a ICU em diferentes cidades, têm sido utilizados diferentes métodos, estes, quando analisados um grupo diverso de pesquisas, podem ser vistos desde quatro abordagens diferentes que podem ser utilizadas de forma independente ou em conjunto: o emprego de transectos fixos e móveis (CARDOSO, 2015), análise de séries temporais (CAMILLONI; BARRUCAND, 2011), sensoriamento remoto (GOUVEA, 2007) e a modelagem numérica dos fenômenos atmosféricos (SILVA, 2016; HENKES, 2017).

Transectos a partir de redes de estações móveis e fixas distribuem-se a partir de pontos espalhados pela cidade e visam colher os registros de temperatura em diferentes espaços na tentativa de identificar contrastes térmicos que determinam a magnitude da ilha de calor urbana. Já a análise de séries temporais é a mais tradicional das técnicas e tem como principal atributo avaliar a evolução dos dados meteorológicos e como a ilha de calor urbana os influencia. Nesse caso, a caracterização da ilha de calor é baseada na diferença entre a temperatura da estação urbana e rural, geralmente condicionada e intensificada nas estações urbanas. Para a seleção das estações são utilizados diferentes métodos, como o de cluster, para agrupá-las segundo suas características semelhantes (SILVA, 2016). No entanto, na maioria das pesquisas são utilizadas poucas estações representativas do clima urbano para serem comparadas com um conjunto maior de estações que representam o clima rural.

No caso dos estudos que empregam sensoriamento remoto na caracterização da ICUS, são realizados a partir do uso das bandas termais. A ferramenta é utilizada em estudos que caracterizam os fluxos de energia em áreas urbanas e as interações entre temperatura de superfície da terra, a vegetação, a água e a interação terra-atmosfera.

No caso dos modelos numéricos, para as áreas urbanas, são utilizados os de meso-escala e comumente em domínios limitados, com alta resolução espacial e centrados nas regiões metropolitanas. Nas últimas décadas, o acoplamento de esquemas de superfícies que melhor representam as áreas urbanas aos modelos atmosféricos permitiu um avanço significativo no estudo da ICU. Muitas pesquisas avaliam as parametrizações de áreas urbanas disponíveis. Entretanto, em muitos trabalhos, o sensoriamento remoto e a modelagem têm sido empregados em conjunto com os dados das estações fixas e móveis buscando validar os dados remotos e simulados e, assim, complementar a metodologia de análise (GOUVEA, 2007).

Outro aspecto importante é a poluição atmosférica que pode ser incrementada pela ICU, seja pelo aumento das emissões devido ao consumo maior de energia ou por favorecer a taxa de ocorrência de reações químicas com o aumento da temperatura que produzem espécies tóxicas como ozônio (AKBARI et al., 2008). No entanto, este é um aspecto ainda complexo onde não existe consenso. Enquanto alguns estudos sugerem o aumento da poluição com o aumento da intensidade da ICU (IICU) (MARTINILLI et al., 2002), outros obtêm resultados opostos. Na pesquisa realizada por Parrish et al. (2011) ficou clara a influência externa de outro fator, no caso os sistemas meteorológicos de grande escala, sobre o transporte de poluentes a escala intercontinental e também sobre a intensificação da ilha de calor urbana.

2.2.1 Relação entre superfície, ilha de calor e tempo severo em regiões urbanas.

Outro aspecto de vital importância para as áreas urbanas, e também vinculado com o tipo de superfície e a ICU consequente, é a relação que estes têm, seja direta ou indireta, com a formação de nuvens convectivas severas (ou tempo severo). Esse tema é um pouco mais complexo, pois as mudanças na precipitação induzidas pela área urbana são mais difíceis de detectar pela sua sutileza quando comparadas com as de outras variáveis meteorológicas como o vento.

A CLP, onde a turbulência é predominante, é a porção atmosférica que conecta a formação da ICU ao regime de tempestades e precipitação. Nas áreas urbanas, a CLP apresenta um perfil termodinâmico uniforme e diferente das áreas adjacentes rurais, devido principalmente ao fluxo de calor sensível, antropogênico ou não, liberado pela camada do dossel urbano bem perto da superfície até os telhados das edificações. São as modificações na circulação do vento local, provocadas pela ICU, que se relacionam com a formação do tempo severo, isso quando ventos de escala sinótica são fracos o que dificulta a mistura do ar das cidades e das áreas rurais.

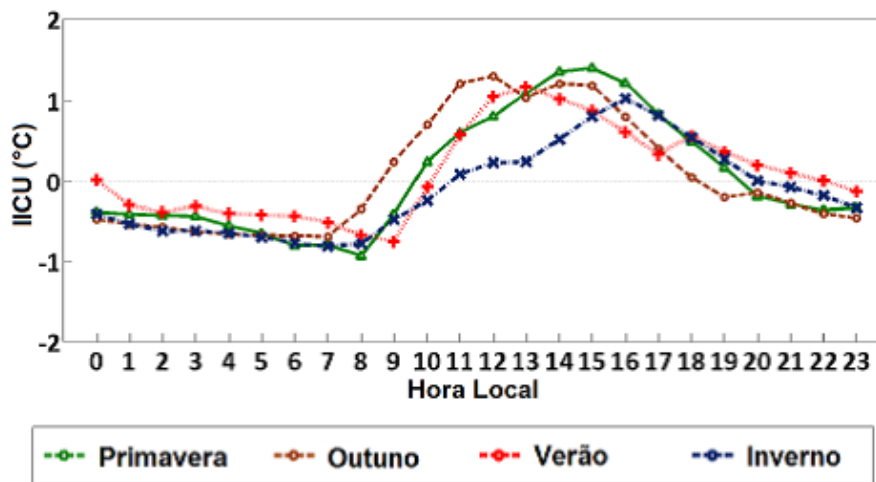
A ICU é fundamental na formação de uma circulação local típica de áreas urbanas conhecida como brisa urbana, e que se caracteriza pela convergência dos ventos na superfície e divergência no topo da CLP da área urbana. A influência da ICU na formação do tempo severo depende também do nível de umidade em baixos níveis (DIXON; MOTE, 2003). Então, uma fonte de umidade, como por exemplo a brisa marítima, atuando em conjunto com a ICU influencia no desenvolvimento do processo de convecção. Quando se mistura o ar quente e seco da cidade com o ar relativamente úmido e frio do mar há o favorecimento da instabilidade convectiva e o desenvolvimento de células mais intensas. Esse mecanismo tem sido observado em vários estudos realizados em áreas urbanas, incluindo cidades como Mumbai, na Índia, onde a precipitação na época pré-monçônica se deve em maior medida à interação entre a ICU e a temperatura superficial do mar (TSM) que causa uma zona de convergência de mesoescala, razão principal do transporte de umidade (LEI et al., 2008). Tem se verificado, em algumas pesquisas, que a interação entre a brisa marítima e a ICU é mais significativa quando maiores regiões urbanas estão envolvidas e estas estão o suficientemente longe da costa tal que a ICU tenha tempo para se desenvolver (FREITAS et al., 2007).

Os efeitos da ilha de calor urbana, além de alterarem o regime de tempestades convectivas, podem influenciar a atividade de raios e relâmpagos que ocorrem na área urbana (SORIANO; PABLO, 2002). Lal e Pawar (2011) avaliaram os efeitos de urbanização e da ilha de calor urbana na quantidade de raios e relâmpagos e na profundidade óptica dos aerossóis para quatro cidades metropolitanas da Índia, duas localizadas na área costeira (Mumbai e Kolkata) e duas localizadas no interior (Bangalore e Délhi). Na tendência dos raios e precipitação para as duas cidades do interior, em 8 anos foi verificado uma tendência de aumento da atividade de raios, contudo, as causas do aumento dessa atividade mostraram-se diferentes para as duas cidades. Na cidade de Délhi, a profundidade óptica dos aerossóis não apresentou nenhuma tendência, sugerindo que o aumento da atividade de relâmpagos possa ser principalmente devido ao efeito da ilha de calor urbana. Na cidade de Bangalore, o aumento da atividade dos raios pode ser atribuído aos efeitos dos aerossóis, já que houve um aumento na tendência da profundidade óptica dos aerossóis, isso considerando as características específicas do estudo.

2.2.2 Ilha de calor na RMSP.

No caso específico da RMSP, o estudo de Silva (2016) encontrou padrões espaciais da ICUA utilizando funções ortogonais empíricas. Nesse estudo também se caracterizou a intensidade da ICU presente na região. Na Figura 2.8 são apresentados os ciclos diurno e sazonal dessa intensidade. A primavera é a estação que apresenta os valores máximo e mínimo da IICU em comparação com as outras estações. Para o período diurno, no inverno se registram os valores mais baixos da IICU. A máxima IICU ocorre em horários diferentes para cada estação, na primavera, no verão e no inverno, os valores máximos de IICU ocorrem em média às 15 Hora Local (HL), 13HL e 16HL, respectivamente. No outono, dois máximos são observados, um às 12HL e outro entre 14-15HL. Essas diferenças de horários entre estações estão relacionadas com a variação sazonal da radiação solar incidente na superfície.

Figura 2.8 - Ciclos diurno e sazonal da intensidade da ICUA na RMSP obtido a partir de dados de estações meteorológicas nessa região.



Fonte: Silva (2016).

Na RMSP tem se observado que o comportamento deste fenômeno, de forma geral, segue a evolução diurna do saldo de radiação na superfície para todos os meses do ano, mas que geralmente apresenta um atraso de três horas em relação à intensidade máxima do saldo de radiação (SILVA, 2016).

Outros estudos que abordaram as características da ICU na RMSP são apresentados a seguir:

Silva (1986) estudou a relação entre a ICU e as circulações de brisa para a RMSP com o uso de um modelo bidimensional destinado a estudar circulações associadas aos fenômenos da brisa marítima-terrestre, ICU e a brisa de vale-montanha. Verificou-se que há um atraso na chegada do frente de brisa marítima na RMSP em decorrência da presença da região urbana. Além de observar que o efeito da topografia, combinado com a ICU, provoca um maior desenvolvimento vertical da CLP, acarretando em um aumento na sua temperatura média. Além disso, o efeito da topografia provoca uma intensificação geral da circulação associada à brisa marítima.

Pereira (2000) demonstrou que a ICU combinada com a umidade da brisa marítima pode afetar o desenvolvimento da convecção local na RMSP. A mistura de ar seco e quente da área urbana com o ar mais úmido e frio do mar favorece a instabilidade convectiva e o desenvolvimento de células convectivas muito intensas na RMSP.

Alguns resultados discordam daqueles obtidos por Silva (1986), como Freitas (2003), que verificou que a área urbanizada da RMSP contribui para uma propagação mais rápida da frente da brisa até a porção sul em decorrência das circulações geradas pela ICU e um atraso na chegada da frente de brisa na zona norte. Além disso, verificou-se que a ICU faz com que a velocidade dos ventos da circulação de brisa marítima seja mais intensa, ocasionado pela forte convergência gerada pela ilha de calor urbana.

Gouvêa et al. (2006) avaliaram um caso de tempestade ocorrida na cidade de São Paulo que causou um grande alagamento na área central da cidade. Esta tempestade, embora tenha ocorrida sob a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma relevante forçante na escala sinótica, sofreu também uma forte influência do efeito de ilha de calor urbana e da brisa marítima. Os resultados mostram que a presença da ZCAS foi responsável por gerar instabilidade e trazer umidade da Amazônia, porém a brisa marítima e o efeito de ilha de calor urbana tiveram o papel de iniciar e intensificar a convecção. Os dados observados mostraram que a precipitação teve início por volta das 15HL, cerca de duas horas após a máxima temperatura do dia e coincidente com o horário de entrada da brisa marítima. A junção entre estes dois fatores, calor e umidade, associado à topografia da região, foi determinante para a intensa convecção que ocasionou a tempestade.

Freitas et al. (2007) apontaram que a ICU da RMSP forma uma zona de forte convergência no centro da cidade de São Paulo, a qual atua para acelerar a frente de brisa do mar até atingir o centro da cidade da RMSP. Em decorrência dessa forte zona de convergência no centro da cidade, as circulações induzidas a partir da RMSP atuam no sentido de bloquear a brisa marítima ao longo da cidade por cerca de duas horas, carregando uma grande quantidade de umidade da superfície para níveis superiores da atmosfera urbana. No entanto, posteriormente, a brisa marítima avança além da cidade quando a ilha de calor se dissipa.

Dias et al. (2013), como resultado de um estudo climático, sugerem que alterações nos valores extremos de precipitação diária principalmente na estação úmida podem estar associadas à intensificação da ICU pelo crescimento da cidade e às variações nas concentrações de poluentes.

A relação entre a poluição e a ICU é um aspecto interessante a considerar pela importância que as concentrações dos contaminantes têm, não só na saúde, mas também nos fenômenos atmosféricos. A própria pesquisa de Silva (2016) faz um estudo dessa interação. Para isso dois métodos de análise foram utilizados, o primeiro método com foco na análise da distribuição da concentração dos poluentes para diferentes valores e níveis de intervalos de IICU, e o segundo método com a aplicação do teste de comparação de médias. Os testes de comparações de médias são usados para detectar diferenças entre os tratamentos para mostrar quais diferem ou não estatisticamente, quando o objetivo é comparar tratamentos qualitativos e verificar se existe diferença significativa entre contrastes ortogonais dos tratamentos. Destacam-se os testes de Tukey, Duncan, Dunnett e o teste LSD (SOUSA et al., 2012).

Os resultados do primeiro método evidenciaram uma clara interação da concentração do O_3 e do MP_{10T} com a IICU, ambos os poluentes apresentam um padrão de aumento de suas concentrações com a intensificação da ICU. Para o CO e NO_x , os resultados apresentaram dois padrões distintos, primeiramente uma tendência de elevação da concentração nos primeiros níveis da IICU, e a partir de um valor de corte da IICU a concentração do CO e do NO_x parecem diminuir ou mesmo estagnar. As concentrações do CO e do NO_x mostram ter uma relação com a intensificação da IICU, no entanto, essa interação parece não ser linear.

No segundo método de abordagem avaliou-se, pelo teste de médias de Duncan, a concentração dos poluentes para diferentes níveis de IICU. O teste permitiu identificar, se as concentrações em cada nível eram iguais ou diferentes entre si, verificando se houve aumento da concentração com a intensificação da IICU.

O teste de Duncan para o O_3 e para o MP10T apresentou resultados coerentes com os resultados do primeiro método. Estatisticamente, mesmo que os valores médios das concentrações sejam similares nos primeiros níveis de IICU, foi observado um aumento dos valores médios da concentração de O_3 e MP10T com a intensificação da IICU. O teste de Duncan para o NO_x e o CO apresentou resultados imprecisos. Para o CO, apenas a primavera de 2011 apresentou resultado estatístico favorável que distingue a interação do aumento da concentração de CO com a intensificação da ICU. Para o NO_x , apesar da imprecisão encontrada nos níveis de IICU com as médias de concentração, foi possível observar uma relação positiva do aumento da concentração do NO_x com a IICU (SILVA, 2016).

Bender et al. (2019) estudaram o impacto do crescimento da mancha urbana na RMSP sobre a precipitação. Para isso utilizaram simulações feitas com o modelo *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) para um caso de tempo severo ocorrido em fevereiro de 2013. Ao utilizar cenários de expansão da mancha urbana para o ano de 2030 os autores encontraram que o cambio de uso de solo contribuiu com o aumento da precipitação total acumulada.

2.3 Modelos numéricos de previsão do tempo meteorológico e da química da atmosfera.

Os modelos de previsão numérica de tempo são atualmente uma das principais ferramentas de pesquisa em ciências atmosféricas e do sistema terrestre. Além disso, estes modelos são aplicados rotineiramente para a previsão de tempo e clima em centros operacionais. O desenvolvimento de modelos de PNT tem sido feito de forma acelerada desde a segunda metade do século XX, isso depois de Lewis Richardson descrever em 1922 um método para integrar numericamente as equações governantes da evolução da atmosfera. Se refere a modelo numérico meteorológico quando essas equações são implementadas em um ambiente computacional.

De acordo com a escala espacial e temporal, os modelos podem ser classificados em três grupos principais, os modelos globais que simulam os processos atmosféricos na escala planetária, com uma resolução espacial normalmente baixa e que são muito utilizados em estudos climáticos, os modelos regionais ou de mesoescala que se limitam a estudos de áreas geográficas de interesse, e por último os modelos que trabalham na microescala e que simulam os processos de turbulência e da superfície por terem a alta resolução espacial.

Os modelos regionais e de microescala são conhecidos também como modelos de área limitada pelo fato de centrarem-se em regiões específicas, estes precisam informações adicionais durante a execução como, por exemplo, as condições de contorno que são obtidas de modelos de escala ou domínio espacial maior.

A modelagem dos processos químicos na atmosfera é uma ferramenta importante no diagnóstico e prognóstico da composição química atmosférica, tanto no âmbito global como no regional. Vários estudos têm mostrado a importância dos modelos na previsão da química da atmosfera (FREITAS et al., 2017; ALONSO, 2011; LONGO et al., 2013; GACITA, 2011).

Modelos numéricos que contemplam a solução da química e transporte de gases e aerossóis interligados com a solução do estado atmosférico, representam o estado da arte em modelagem acoplada da atmosfera. Tais modelos são comumente denominados “modelos acoplados” (ou do inglês, *on-line*) e as duas principais vantagens de um modelo *on-line* são: o uso da mesma dinâmica na solução da meteorologia e da química e o *feedback* (retroalimentação) dos efeitos associados à presença dos poluentes para a meteorologia (por exemplo, o impacto dos aerossóis nas taxas de aquecimento radiativo). A utilização de um sistema único de coordenadas espaciais e a utilização de parametrizações físicas do modelo atmosférico, faz com que o transporte das partículas de aerossol e gases traço seja consistente com o modelo atmosférico em si e minimiza erros numéricos associados às interpolações que ocorrem quando o sistema é integrado no modelo *off-line* (veja adiante).

Existem vários exemplos de modelos numéricos usados para estudos de tempo químico em escala regional. O CFORS (*Chemical weather FORecast System*) (UNO et al., 2003) é um modelo operacional de previsão de tempo químico, interligado com o modelo regional de mesoescala RAMS (*Regional Atmospheric Modelling System*) (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003), amplamente utilizado no continente asiático. Uno et al. (2003) mostraram que o modelo conseguiu reproduzir adequadamente relevantes aspectos das observações obtidas durante o experimento ACE-Asia (*Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment* – <http://saga.pmel.noaa.gov/Field/aceasia/>).

O modelo WRF/Chem (*Chemical Weather Research and Forecasting Model* – (GRELL et al., 2005)) é uma versão do WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) que permite a simulação da emissão, transporte, transformações químicas e deposição de gases traços e aerossóis.

O *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS) (FREITAS et al., 2017) é um modelo de transporte químico atmosférico 3D on-line, capaz de simular as emissões, transporte, processos de remoção de gases traços e aerossóis e a reatividade química na atmosfera. O modelo atmosférico BRAMS é baseado no RAMS, com vários desenvolvimentos associados com a representação de cúmulos de convecção, inicialização de umidade do solo, esquema de superfície ajustada para o continente sul-americano, entre outros. Além do transporte na escala da grade, estão incluídos os efeitos de turbulência na escala sub-grade, o transporte convectivo associado à convecção rasa e profunda, a ascensão da pluma vinculada a focos de calor em áreas vegetadas, dentre outros (FREITAS et al., 2017).

Com relação aos modelos numéricos para estudos de tempo químico em escala global cita-se: o MOZART (*Model of Ozone and Related Chemical Tracers*), operacionalmente na sua segunda versão que assimila os campos meteorológicos gerados pelo *Middle Atmosphere version of the Community Climate Model* (MACCM3); o modelo *Geórgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport Model* (GOCART), que assimila os campos meteorológicos gerados pelo *Goddard Earth Observing System Data Assimilation System* (GEOS-DAS). Seus principais produtos são: espessura óptica do aerossol e concentração para componentes individuais de aerossóis como sulfato, carbono preto e orgânico, poeira e sal marinho.

Os modelos numéricos que resolvem a química e transporte de gases e aerossóis independente da solução do estado atmosférico são conhecidos como desacoplados (*off-line*). Os modelos desacoplados são computacionalmente menos onerosos em relação aos modelos acoplados e podem ser usados, por exemplo, para análises de sensibilidade de mecanismos químicos (MQ), em situações nas quais o impacto da meteorologia é mínimo. Porém, os modelos desacoplados apresentam erros numéricos associados à interpolação em (x,y,z,t) , o que pode levar, dentre outros problemas, à violação da conservação de massa (FREITAS et al., 2007). Para uma descrição mais realista da atmosfera, em modelos de tempo químico é de suma importância utilizar uma abordagem que contemple a retroalimentação dos processos químicos e atmosféricos. Nessa característica reside a principal diferença entre os modelos interligados e desacoplados.

2.3.1 Base física e matemática dos modelos numéricos na meteorologia, as suas componentes.

A modelagem numérica na meteorologia é possível porque a atmosfera é um sistema físico governado por leis determinísticas, o conjunto de equações utilizado nos modelos é denominado de equações primitivas. Essas equações expressam leis de conservação aplicadas a parcelas individuais de ar: conservação do momento tridimensional (equações de movimento), conservação de energia (primeira lei de termodinâmica), conservação da massa do ar seco (equação de continuidade) e a equação para a conservação da umidade em todas suas fases assim como a equação de estado para gases ideais. O conjunto de equações é implementado nos modelos de previsão numérica. Estas equações são tratadas mediante análises de escala para determinar a importância relativa de termos individuais e fazer algumas simplificações assim como filtrar movimentos não desejados já que elas descrevem vários tipos de ondas, inclusive as acústicas e de gravidade sem significado meteorológico.

Esse sistema de equações fundamentais que descrevem os processos atmosféricos pela física clássica não possui solução analítica, portanto, é resolvido numericamente através de metodologias de discretização numérica, a partir da qual se obtém a solução em pontos de grade. Resumidamente, pode ser dito que esta solução corresponde a uma média estatística de cada variável prognóstica na célula do espaço-tempo discretizado. Comumente, utiliza-se a decomposição de Reynolds para a solução numérica das equações atmosféricas, na qual cada variável (v) é separada em termos de sua média (\hat{v}) e de sua flutuação em torno desta (v').

$$v = \hat{v} + v' \quad (2.1)$$

Em função do espaçamento da grade e do intervalo de tempo adotado, dividem-se os fenômenos atmosféricos em duas famílias principais, dependendo se sua solução é explícita (resolvida) ou não não-resolvida (ALONSO, 2011).

Para se obter o prognóstico final utilizando modelos numéricos, resolve-se a tendência total através da solução individual de cada termo, chamados de tendência local. Portanto, a razão de mistura de uma determinada espécie é influenciada tanto por processos não-resolvidos, como a turbulência e a convecção, quanto por processos resolvidos na escala da grade, como a advecção.

O transporte resolvido numericamente por esquemas de advecção deve conservar a massa, ser monotônico, isto é, não gerar oscilações de Gibbs, manter a solução positiva definida e não demandar excessiva informação lateral para compor os gradientes necessários para a solução numérica. Já o transporte na escala sub-grade, associado aos processos de difusão na CLP, é parametrizado aplicando-se a teoria K, na qual os fluxos turbulentos são proporcionais ao gradiente da quantidade média transportada através de um coeficiente de difusividade (K).

Esquemas que seguem esta abordagem são muito dependentes dos coeficientes de difusividade, que podem ser especificados como uma função da rugosidade da superfície, estabilidade termodinâmica da atmosfera, cisalhamento do vento, dentre outros. Além do transporte, os gases e partículas em suspensão sofrem processos de deposição. A deposição seca de gases e partículas consiste no transporte destes materiais da atmosfera para a superfície, e é controlada pela turbulência atmosférica, propriedades químicas das espécies e pela natureza da superfície receptora. O processo de deposição úmida ocorre quando o material em questão está embebido por uma porção de água condensada que, via precipitação, acaba sendo depositado sobre a superfície abaixo. Para parametrizar esse processo, assume-se a lei de Henry, que estabelece um estado de equilíbrio entre as fases gasosa e aquosa (LONGO et al., 2013).

Os modelos de PNT têm dois componentes principais, o modelo físico e o núcleo dinâmico; a maioria dos modelos atuais têm também um componente relacionado com a assimilação de dados e com a previsão em conjunto (ensemble). A componente física inclui as diferentes parametrizações que são utilizadas para representar os diferentes processos físicos relevantes que ocorrem na atmosfera e não podem ser resolvidos na escala da grade dos modelos. São procedimentos matemáticos que descrevem os efeitos estatísticos desses processos sobre o fluxo médio em função de parâmetros de grande escala. As parametrizações envolvem, por exemplo, a turbulência na camada limite planetária, fluxos de superfície, convecção, microfísica de nuvens e precipitação, radiação e processos de química e aerossóis.

O componente de assimilação de dados tem grande importância também, pois o processo de PNT é um problema de valor inicial, portanto, quanto melhor representadas estejam as condições iniciais espera-se que melhores prognósticos sejam obtidos. O processo encarregado de prover aos modelos de condições iniciais consistentes dinamicamente com a resolução utilizada e com os dados observados se chama de análises objetiva, e é nele que a assimilação de dados tem um papel fundamental. Depois com o resultado da análise se realiza a inicialização onde se aplicam diferentes técnicas para alcançar a consistência dinâmica entre as variáveis de massa (temperatura, pressão) e de *momentum* (velocidade), e assim eliminar ruídos e ondas que não são de interesse.

A componente dinâmica será tratada de forma separada no próximo Item pela relevância para o presente trabalho.

2.3.1.1 Núcleo dinâmico dos modelos de PNT.

O núcleo dinâmico refere-se à forma como as diferentes equações de prognóstico, mencionadas anteriormente, são representadas e integradas numericamente. O núcleo dinâmico dos modelos de PNT também inclui os esquemas de integração temporal, de advecção e de difusão.

A impossibilidade da solução analítica das equações diferenciais que regem o comportamento da atmosfera (neste caso o modelo matemático) faz com que sejam utilizados métodos numéricos com complexidades diferentes para achar uma aproximação da solução verdadeira para o sistema de equações num finito número de valores (discretização). Esses métodos numéricos, que são inexatos, têm características variadas que os fazem mais ou menos eficientes em relação ao número de cálculos a serem realizados para obter a aproximação do resultado das equações. Ao mesmo tempo, o aumento da complexidade implica, na maioria dos casos, em melhor precisão e maior realismo das soluções.

Existem vários métodos, sendo os seguintes os mais conhecidos: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e os Métodos de Galerkin que incluem, entre outros, o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método Espectral (ME).

No caso dos Métodos de Galerkin, as variáveis dependentes são representadas por uma soma de funções que tem uma estrutura espacial prescrita, e os coeficientes associados a cada função são normalmente função do tempo. As equações diferenciais parciais resultam num conjunto de equações diferenciais ordinárias para os coeficientes, que são resolvidas usando o MDF no tempo. O MEF usa funções que são nulas, exceto em região limitada onde elas são polinômios de baixo ordem, o ME usa funções ortogonais (ex. séries de Fourier, polinômios de Chebyshev ou Harmônicos Esféricos) (REZENDE, 2005). O MEF não é muito utilizado em modelos atmosféricos, porque se geram equações implícitas em cada novo passo de tempo (FERREIRA, 2013), o que implica um maior custo computacional, como será visto adiante.

O MVF consiste primeiramente em decompor o domínio em pequenos volumes de controle onde as variáveis são armazenadas nos nodos, usualmente os volumes de controle e os nodos são definidos com uma malha. Os nodos, localizam-se nos vértices dessa malha e nos centros dos volumes, e é a informação disponível para aproximar a solução no resto do domínio. Depois de definido os volumes de controle, as equações de conservação são formuladas para cada volume, nesse processo o teorema da divergência de Gauss é usado para converter integrais de volume sobre operadores de divergência e gradiente a integrais de superfície. Para a obtenção final do sistema de equações algébricas se faz a aproximação dos valores das variáveis nas superfícies e as derivadas das equações utilizando a informação das variáveis nodais. O MVF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada a um sistema de coordenadas (GONÇALVES, 2007).

O MVF tornou-se tendência nas pesquisas dos últimos anos sobre núcleos dinâmicos de modelos de PNT, um exemplo é o desenvolvimento do novo núcleo dinâmico para o *Global Forecast System* (GFS) na NOAA denominado *Finite-Volume on a Cubed-Sphere* (FV3) (<https://www.gfdl.noaa.gov/fv3/>). O FV3 aporta um novo nível de precisão e eficiência numérica que faz possível a simulação de processos atmosféricos com resoluções ainda não utilizadas em modelos globais.

No MDF o domínio de solução é coberto por uma grade. Em cada ponto de grade, a equação é aproximada substituindo as derivadas parciais por aproximações em termos de valores das funções nos nodos da grade. O resultado é uma equação algébrica por nodo da grade, na qual o valor da variável num certo número de nodos vizinhos aparece como incógnita. No final resulta num conjunto de equações que podem ser resolvidas por métodos algébricos. Para obter aproximações para a primeira e segunda derivadas da variável são usadas expansões em séries de Taylor. Considerando o número de termos empregados para fazer a aproximação das derivadas, pode-se definir o erro de truncamento como o restante da série que não é considerado e que determina a ordem do erro.

Partindo do princípio da utilização da série de Taylor para fazer as aproximações é possível determinar vários esquemas de aproximação, tanto espaciais como temporais. Aspectos como a convergência, consistência e estabilidade são tidos em consideração para validar a eficiência desses esquemas. Um esquema é considerado convergente quando a solução discretizada das equações diferenciais se aproxima da solução contínua (analítica), já um esquema é avaliado como consistente quando o erro de truncamento da equação discretizada tende a zero. Por último, a estabilidade está condicionada pela permanência de soluções finitas (que não cresce no tempo) e existem vários métodos para tentar manter estável a integração, como exemplo tem-se o critério de *Courant–Friedrichs–Lewy* (CFL), que determina a relação entre a resolução espacial e temporal, o qual implica que se aumenta a resolução espacial então deve-se diminuir o passo temporal. O critério de CFL, no entanto, é uma condição necessária, mas não suficiente para manter a estabilidade de um esquema de aproximação. O teorema de Lax-Ritchmyer expressa que se a discretização é consistente e estável então é convergente (JACOBSON, 2005).

Em relação aos esquemas espaciais existem três tipos fundamentais que são utilizados para a primeira derivada: esquema avançado (o valor da derivada num ponto depende do valor da variável nesse ponto e no ponto seguinte), esquema atrasado (o valor da derivada num ponto depende do valor da variável nesse ponto e no ponto anterior) e o esquema centrado (o valor da derivada num ponto depende do valor da variável no ponto seguinte e no anterior). No caso dos dois primeiros esquemas espaciais abordados a ordem do erro de truncamento é um e no caso do esquema centrado é de ordem dois. É possível também obter uma aproximação para a segunda derivada com erro de ordem dois.

Os esquemas de integração temporais básicos são denominados de explícito e implícito. No esquema implícito se expressa o estado futuro do sistema em função do estado atual, já no esquema implícito o estado futuro do sistema não só depende do estado atual como também do próprio estado futuro. Utilizando um esquema implícito para a integração temporal asseguramos que este seja incondicionalmente estável, no entanto, o alto custo computacional derivado dos processos iterativos necessários para a resolução dificultam sua implementação. Os esquemas semi-implícitos são uma alternativa, mas nesse caso o passo temporal é determinado pelo critério de CFL (JACOBSON, 2005).

Um outro exemplo de esquema numérico que é usado na discretização temporal, baseado no método de diferenças finitas e utilizado nos modelos de PNT, é o método de Leapfrog (<https://www.if.ufrgs.br/~leon/metcomp/ode/node11.html>). Este método utiliza um esquema centrado para aproximar a derivada, é de relativo baixo custo computacional e uma ordem superior a outros esquemas de integração temporal. Porém, atualmente deixou de ser prioridade, pois para sua utilização nos modelos de PNT é preciso aplicar o chamado filtro de Asselin para impedir a instabilidade, o que acaba reduzindo até um a ordem do erro de truncamento. Além disso, os avanços computacionais permitem utilizar outros esquemas mais avançados como é o caso dos derivados dos métodos de passo simples e de passo múltiplo.

Os métodos de passo simples (principalmente aqueles derivados da série de Taylor, os métodos de Runge-Kutta de variadas ordens) são aqueles onde o valor da variável num dado tempo depende só de um valor anterior da solução armazenado (JACOBSON, 2005). O espaço em memória a utilizar é significativamente menor em relação com os métodos numéricos de passo múltiplo (exemplo o método Adams-Bashforth, o método Adams-Moulton e os métodos preditor-corretor) onde várias soluções anteriores são utilizadas para avançar a solução no tempo (BURDEN; FAIRES, 1996).

Um exemplo dos esquemas derivados dos métodos de passos simples que apresenta bons resultados é o Runge-Kutta de ordem três (RK3). Este já foi implementado para o sistema de equações não lineares que descreve os processos da atmosfera de forma satisfatória, possui um domínio de estabilidade mais largo que outros métodos, incluídos os de passos múltiplos, e quando associado com esquemas de advecção discretizados com alta ordem permitem passos de tempo significativamente maiores (WICKER; SKAMAROCK, 2002). Esse último aspecto é devido ao fato de que, quando empregado RK3, o máximo valor do número de Courant (critério de estabilidade CFL) apresenta diferentes valores em função da ordem da discretização espacial.

Atualmente, com avanços no aspecto computacional, é possível utilizar esquemas de advecção discretizados com alta ordem e fazer os cálculos de forma paralela pois a capacidade de transmissão de informação aumentou. Esse aspecto limitava no passado, pois quanto maior a ordem do esquema mais informação é preciso enviar de um processador, o que faz os cálculos para uma região específica do domínio, para outro, o que integra para outra região com fronteiras compartilhadas onde o processo de advecção não pode ser interrompido. Além disso, tem se desenvolvido limitadores que permitem aumentar a acurácia dos esquemas de discretização espacial para a advecção. Exemplos são o denominado positivo-definido, onde não são geradas razões de misturas negativas a partir de razões de mistura iniciais positivas.

Também tem se demonstrado a conveniência de utilizar esquemas de integração temporal derivados de métodos de passos múltiplos, exemplo o preditor-corretor formado pela combinação do esquema Adams-Bashforth (2^{da} ordem) e o esquema Adams-Moulton (3^{era} ordem) (WICKER, 2009).

Vista toda a informação apresentada até aqui fica claro que para realizar simulações cada vez mais consistentes com a realidade é preciso desenvolver um conjunto de fatores que em resumo permitam utilizar grades com melhores resoluções e diminuir as aproximações e simplificações das equações que descrevem os processos atmosféricos. Nesse sentido, a utilização de núcleos dinâmicos, que permitam realizar as integrações com passos temporais maiores sem perder a acurácia e mantendo os critérios de estabilidade, favorecem a utilização de resoluções espaciais o suficientemente boas para eliminar processos parametrizados e permitir, por exemplo, a representação explícita das nuvens.

Entre as simplificações que é preciso eliminar quando se trabalha com alta resolução (especificamente nas resoluções em que se resolve as nuvens explicitamente, aproximadamente $< 4\text{km}$) está a aproximação hidrostática. Para modelos com resolução horizontal superior a 10 km, é habitual substituir a componente vertical da equação de movimento pela sua aproximação hidrostática, na qual a aceleração vertical é considerada desprezável em comparação com a aceleração gravitacional (flutuabilidade) (PREIN et al., 2015). Nos processos de microescala a velocidade vertical não pode ser desprezada, por tanto assume-se o modelo não hidrostático, o que leva ao aparecimento de ondas acústicas que exigem passos temporais pequenos para manter a estabilidade. Para eliminar o efeito das ondas sonoras, existem várias estratégias como a utilizada no BRAMS que emprega as equações quase-Boussinesq ou “anelásticas” (FREITAS et al., 2017).

2.3.1.2 Base teórica da parametrização de cúmulos e da microfísica de nuvens.

Como foi visto anteriormente, o modelo físico é um dos principais componentes dos modelos de PNT. Dentro desse componente está inclusa a resolução das características relacionadas com as nuvens, elementos de vital importância, pois determinam de forma indireta a dinâmica global da atmosfera e do clima. Isso porque a liberação de calor latente, envolvida no processo de formação das nuvens, que leva a um aquecimento convectivo ou estratiforme constitui uma das principais fontes de energia para os movimentos atmosféricos em escalas espaciais que vão desde a turbulência local até a circulação global.

As nuvens modificam tanto a quantidade de radiação de onda curta como a de onda longa nos diferentes níveis da atmosfera, esse processo depende das características das nuvens, da altitude, da distribuição do tamanho das partículas que compõem a nuvem entre outros fatores. Além disso, o aquecimento por liberação de calor latente dentro da nuvem associado com a condensação do vapor de água e a consequente precipitação ocorre por meio de processos microfísicos que têm lugar em escalas de tamanho de partículas de nuvens que vão desde micrômetros até centímetros. Foi visto anteriormente que os aerossóis influem nas distribuições das partículas que compõem as nuvens e também no tamanho das mesmas. Fica claro então a importância de uma correta representação das nuvens pelos modelos de PNT e também a complexidade que isso representa. Alguns trabalhos que justificam essa afirmação são Matus e L'Ecuyer (2002), Ferreira et al. (2020), Hassan et al. (2020).

Mesmo com o avanço das tecnologias e o aumento da capacidade de processamento e armazenamento dos grandes computadores no mundo, ainda a maioria dos modelos de PNT de área limitada são rodados em grades com resolução acima de 10 km, e que não realizam a representação explícita das nuvens. Para descrever os processos de aquecimento ou resfriamento por convecção geralmente são utilizados os métodos convencionais de parametrização convectiva como os de Grell e Freitas (2014) e outros também muito utilizados em modelos globais e nas simulações climáticas. O objetivo destas parametrizações é representar o efeito global da convecção de cúmulo que ocorre na escala sub-grade na grande escala espacial representada explicitamente nesses modelos. As parametrizações se fundamentam em considerações empíricas ou semi-empíricas de balanço de massa e equilíbrio de energia. Consideram a microfísica de forma rústica, não obstante muitas dessas parametrizações tenham melhorado substancialmente nos últimos anos.

As parametrizações convectivas, geralmente, não permitem a determinação da cobertura de nuvens, esta é relacionada empiricamente com a variável umidade relativa e sua média na horizontal o que explica a diversidade de resultados obtidos pelos diferentes modelos para um mesmo caso de estudo. Outra característica deste tipo de parametrização é que o aquecimento e esfriamento induzidos pela convecção e os efeitos radiativos induzidos pelas nuvens são tratados separadamente, usualmente adota-se dois esquemas independentes embora esses efeitos estejam atrelados às mesmas nuvens (KHAIN et al., 2015).

Quando é possível realizar simulações com altas resoluções, isto é, quando os recursos computacionais permitem, como é o caso desta pesquisa, a utilização da resolução explícita das nuvens utilizando uma microfísica apropriada contribui para uma melhora significativa na representação dos diferentes sistemas meteorológicos. Nos modelos em que as nuvens são resolvidas (ver Item anterior), a parametrização de convecção é substituída por esquemas que descrevem a evolução das nuvens, denominados esquemas de microfísica. A microfísica de nuvens explica as condições críticas para a formação das gotas de nuvens e seu posterior crescimento, assim como os processos de nucleação, estabilidade e saturação.

Existem dois enfoques principais nos distintos esquemas de microfísica que atualmente são utilizados na meteorologia: o enfoque *bulk* (também conhecidos como esquemas de volume ou a granel) e o enfoque *bin* (também conhecido como enfoque espectral). No caso nos esquemas espectrais, cada tipo de hidrometeoro que faz parte da nuvem é descrito usando as funções de quantidade de massa e a distribuição dos tamanhos das gotas não são calculadas com antecipação e sim no decorrer da integração do modelo. O número de equações a ser resolvido nestes esquemas espectrais é proporcional ao número de tipos de hidrometeoros, o que eleva os requisitos computacionais para a resolução das mesmas e o tempo total de integração, que pode ser entre 5 e 20 vezes maior em relação a os esquemas *bulk* (KHAIN et al., 2015).

Nos esquemas *bulk*, por sua vez, os processos de microfísica são descritos em termos de parâmetros definidos pelas integrais, tais como conteúdo de massa e, em alguns casos, os números de concentração de gotas de água na nuvem e da precipitação. Não é mais do que uma representação das propriedades microfísicas gerais das nuvens utilizando uma função semi-empírica da distribuição do tamanho das partículas, que depende da massa. O número relativamente pequeno de parâmetros faz com que esses esquemas sejam mais eficientes do ponto de vista computacional. Ao mesmo tempo essa eficiência está dada porque as equações da microfísica não estão formadas por diferentes funções de distribuição de tamanho para cada hidrometeoro e sim para uma série de “momentos” utilizados nessas funções de distribuição. Na prática, isso significa, que as constantes que formam parte da função podem ser substituídas por um desses momentos, que não são mais que dados que mudam no tempo relacionados com alguma variável da meteorologia ou química da atmosfera, e assim formar um conjunto de equações. Uma função *gamma* de quatro parâmetros é utilizada normalmente como função principal. O momento k das funções de distribuição é definido da seguinte forma:

$$M^{(k)} = \int_0^{\infty} m^{(k)} f(m) dm \quad (2.2)$$

Onde k é um valor inteiro e $f(m)$ é a função de distribuição de tamanho.

Esquemas que usam só um momento, normalmente sendo o conteúdo de massa dos hidrometeoros, são conhecidos como esquemas de um momento, onde $k = 1$. Já quando se utilizam dois momentos, normalmente concentração (de aerossóis por exemplo) e massa dos hidrometeoros, são conhecidos como esquemas de dois momentos, onde $k = 0$. Para $k = 2$, esquemas de três momentos, as variáveis são as duas anteriores mais a refletividade do radar (KHAIN et al., 2015).

Neste trabalho foram utilizadas parametrizações de microfísica de um e de dois momentos para a obtenção dos resultados principais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos, se seguiu uma linha de trabalho pautada por um conjunto de ações específicas. Tais ações encontram-se descritas de forma resumida a seguir:

- Foram selecionados, para estudo de caso, dois cenários meteorológicos em que houve registros de precipitação extrema na Região Metropolitana de São Paulo. Os casos aconteceram em junho e fevereiro do ano 2017 (para maiores detalhes ver Item 3.3). Posteriormente, foi avaliado o desempenho do sistema CCATT-BRAMS-JULES (ver Item 3.5) na representação das condições atmosféricas para os períodos em que aconteceram os casos de estudo, para isso utilizou-se a última versão do modelo (versão 5.3, (FREITAS et al., 2017)) disponível para os usuários no momento em que começou a presente pesquisa (janeiro, 2018). Para a avaliação do modelo, foram utilizados dados observacionais de um conjunto de estações em superfície e de produtos derivados a partir de medições de diferentes sensores de satélites (dados estimados de precipitação). Paralelamente, o desempenho computacional do modelo foi também avaliado.

- Com a disponibilização da nova versão do sistema CCATT-BRAMS-JULES (versão 5.4), onde as principais modificações estiveram no núcleo dinâmico, se procedeu a avaliar essa versão seguindo o mesmo procedimento e com as mesmas configurações utilizadas na versão anterior. Essa atividade permitiu avaliar o desempenho do modelo com as modificações implementadas no núcleo dinâmico e ao mesmo tempo propiciou a caracterização do desempenho do sistema de modelagem na representação dos casos em estudo.

- A partir da comparação entre as saídas do modelo, dados observados em superfície e os estimados com os sensores de satélites para a precipitação, realizou-se a calibração do sistema de modelagem na sua nova versão (5.4). O objetivo desta calibração foi a obtenção das simulações CONTROLES para os casos de estudos selecionados. A configuração final do modelo para a realização das demais simulações necessárias para a obtenção dos resultados da pesquisa foi estabelecida nesta etapa. Para isso foram realizados algumas ações específicas:

- a realização de experimentos iniciais com o objetivo de encontrar o *melhor* conjunto de dados numéricos para a obtenção das análises (condição inicial) e das condições de contorno. Simulações diferentes foram realizadas utilizando como dados de entrada os obtidos com o GFS e também com o ERA5.

Nas etapas anteriores do estudo foram utilizados apenas os dados do GFS, e com a análise dos resultados obtidos considerando as duas bases, GFS e ERA5, decidiu-se por estabelecer como referência de condição inicial e de contorno os provenientes do ERA5.

- Na sequência foram estudadas os resultados do modelo considerando o método por ENSEMBLE, isto é para o mesmo período de estudo o resultado numérico foi avaliado utilizando distintas simulações inicializadas em momentos diferentes.

- Modificação dos parâmetros de inicialização do modelo para estabelecer a melhor representação possível das condições atmosféricas. Os parâmetros modificados estão relacionados tanto com a componente física como com a componente dinâmica do sistema de modelos CCATT-BRAMS-JULES.

- Atualização e adaptação das sub-rotinas do modelo da microfísica de Thompson de 2 momentos (THOMPSON et al., 2008; THOMPSON; EIDHAMMER, 2014). A partir dos dados disponíveis e de simulações numéricas, foram estabelecidos os parâmetros relacionados com higroscopicidade e raio médio das partículas de aerossóis que seriam utilizados nas simulações CONTROLE sobre a área de estudo (RMSP).

- Na fase mais importante desta pesquisa, foram realizadas e analisadas várias simulações (testes de sensibilidade) considerando a resolução espacial de 1 km e modificando parâmetros da microfísica de nuvens e da superfície urbana. Os resultados foram obtidos via comparação entre essas simulações com foco em testes de sensibilidades e as estabelecidas como CONTROLE, considerando principalmente a análise das mudanças na precipitação. No Item 3.5.3 é feita a descrição detalhada das características específicas de cada simulação envolvendo os testes de sensibilidade.

- Na última etapa, e com vistas a futuros trabalhos onde a retroalimentação entre a química e a microfísica seja possível dentro do modelo, se realizou a implementação de novas funcionalidades na ferramenta de obtenção de emissões de espécies químicas (PREP-CHEM-SRC) (ver Item 3.4.4). Com as novas funcionalidades é possível melhorar o processo de obtenção e representação das emissões urbanas, pois foi introduzida a utilização dos dados locais de emissão veicular segundo a malha viária. A conclusão desta etapa envolveu a caracterização detalhada, quantitativa e qualitativa, das emissões veiculares e tipo de vias em cada município da RMSP. O código da ferramenta PREP-CHEM-SRC foi adaptado para que seja possível o cálculo da emissão total considerando as características específicas da malha urbana (diferentes tipos de vias de mobilidade).

O apresentado no Capítulo 6 é ainda um estudo inicial que precisa ser aprofundado mas que pela sua importância foi incluso neste documento. O resultado dessa fase específica do trabalho é um avanço do que está definido como trabalho futuro a ser feito para melhorar o Sistema de Modelagem integrado e favorecer o funcionamento do módulo de microfísica. Dessa forma, os resultados mostrados no Capítulo 6 em relação com o correto funcionamento das modificações implementadas na ferramenta PREP-CHEM-SRC são preliminares.

3.1 Descrição da área de estudo.

Como especificado na introdução, a área de estudo do presente trabalho é a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A seguir é apresentada a descrição das principais características geográficas, climáticas e do sistema viário da região.

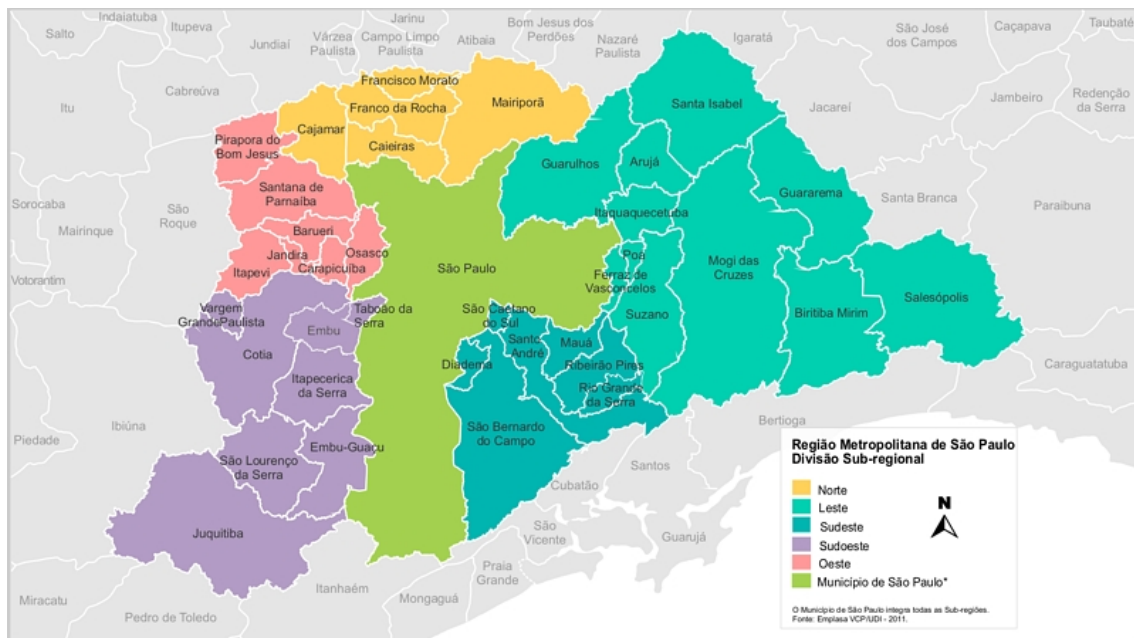
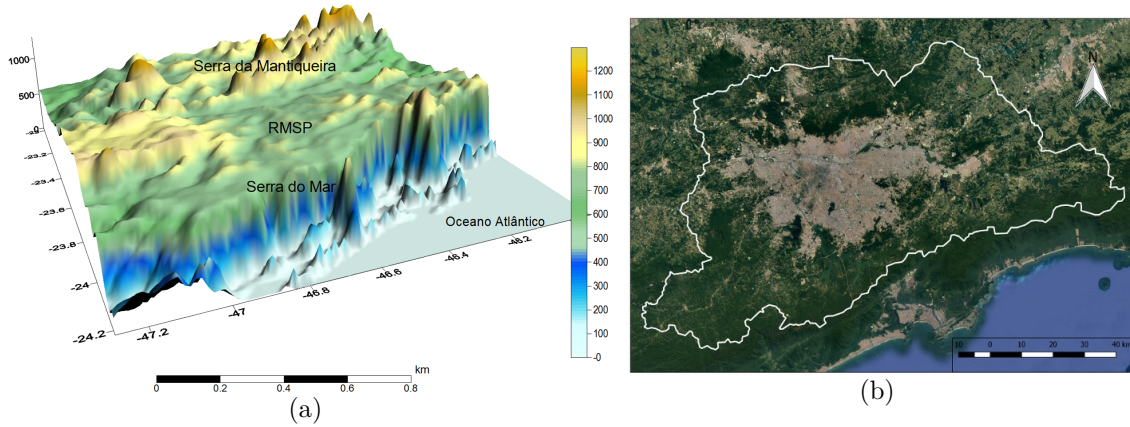
3.1.1 Características geográficas e meteorológicas.

A Região Metropolitana de São Paulo, que fica no Estado com o mesmo nome e está localizada na região Sudeste do Brasil, é a mais importante do país e umas das mais importantes do mundo (o maior conglomerado urbano da América Latina). Desde o ponto de vista administrativo a região foi formalizada em 1973 e seus limites geográficos foram redefinidos pela última vez em 2011 (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A - EMPLASA, 2021). A região se encontra localizada em uma área de planalto cuja topografia é dominada por colinas com altitudes que variam entre 650 m e 1200 m acima do nível médio do mar (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB., 1992). A RMSP é cercada pelas Serras da Cantareira e do Mar (Figura 3.1(a)).

A área total da RMSP é de 7947 km² e inclui 39 municípios que são divididos em cinco sub-regiões mais o município de São Paulo (capital do estado do mesmo nome), como pode ser observado na Figura 3.1(c). O município de São Paulo ocupa a maior área, com 1521 km², seguido por Mogi das Cruzes (713 km²), na sub-região Leste, e Juquitiba (522 km²), na sub-região Sudoeste. Considerando as sub-regiões, a maior em extensão é a Leste (11 municípios) e a menor a Oeste (7 municípios) (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A - EMPLASA, 2021; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE., 2021).

No geral, a RMSP é altamente urbanizada, com a mancha urbana alcançando sua maior densidade no centro da região, isto é, nos bairros centrais do município capital (Figura 3.1(b)). Segundo dados atualizados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a mancha urbana na RMSP ocupa uma área de aproximadamente 2016,2 km², sendo 1879,52 km² de área urbana densa e 136,68 km² de área urbana pouco densa (Figura 3.2). Isso significa que, em relação à área total da RMSP, aproximadamente 25 % de toda a região é ocupada por áreas urbanizadas. Depois do município de São Paulo, as sub-regiões com maior área urbanizada são a Sudeste e Oeste. Nas regiões das serras, tanto da Mantiqueira, ao Norte, como Serra do Mar, ao Sul, ainda existem grandes áreas do bioma Mata Atlântica conservadas. O restante da zona não urbanizada se divide entre áreas de pastagem, resquícios de Mata Atlântica e áreas de cultivo.

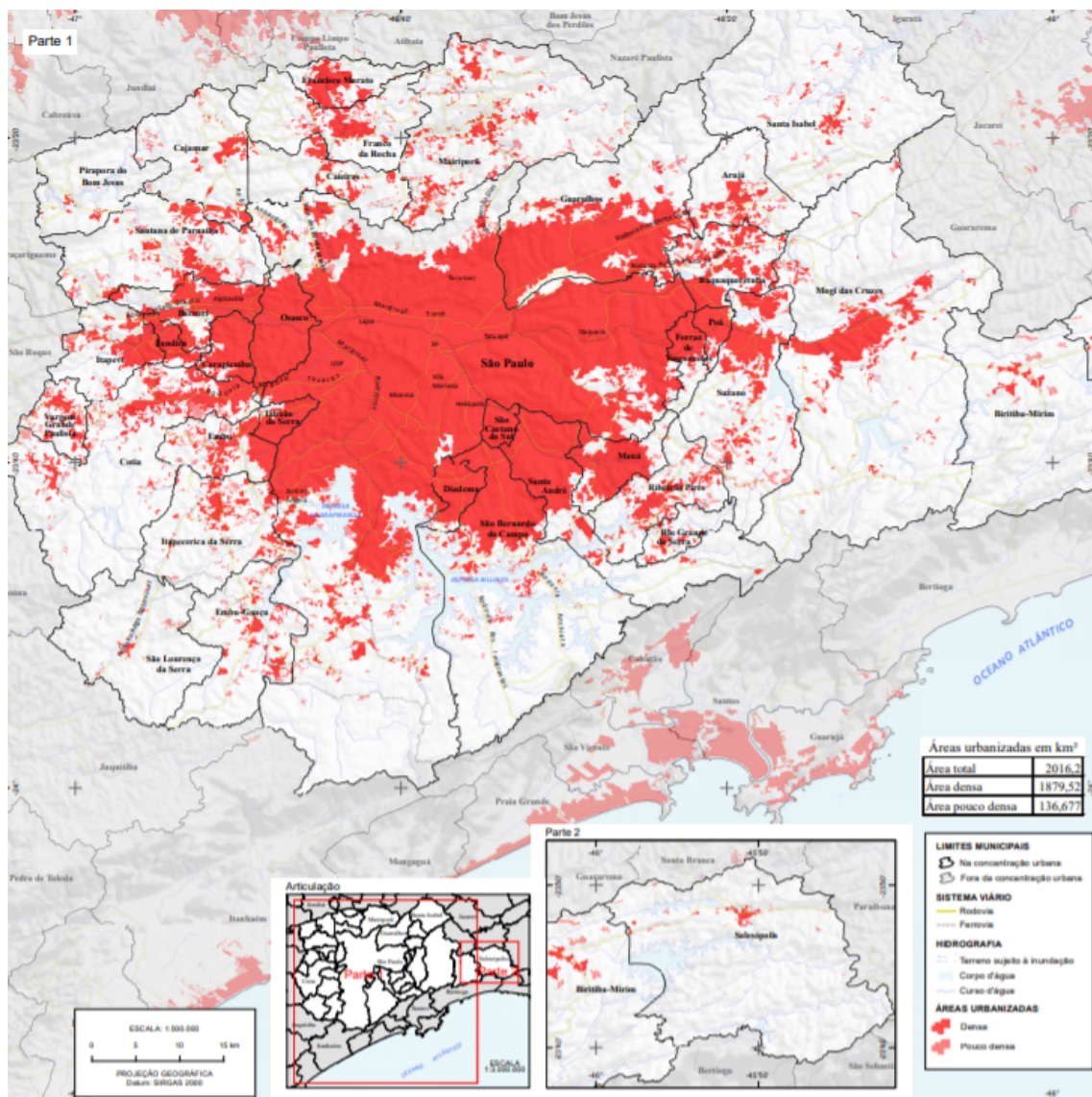
Figura 3.1 - Região Metropolitana de São Paulo. (a) Mapa tridimensional da topografia da porção leste do Estado de São Paulo, onde se encontra a RMSP. (b) Visão da RMSP com o seu centro densamente urbanizado e o entorno ainda com expressiva presença de vegetação. (c) Municípios e sub-regiões da RMSP.



Fonte: a) Silva et al. (2017), b) Google Earth, c) EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A - EMLPASA (2021).

Segundo cenários criados por Nobre (2011) e Young (2013), a estimativa é de que a periferia, ainda com mata nativa, será ocupada em grande proporção até o ano de 2030, o que implicaria em um aumento da emissão de poluentes para a atmosfera piorando a qualidade do ar na região. Essa expansão da área urbana, uma vez concretizada, também pode causar um aumento na intensidade do efeito de ilha de calor já observada na RMSP, fenômeno que está também relacionado com a qualidade do ar (ver item 2.2).

Figura 3.2 - Mancha urbana da RMSP.



Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2021).

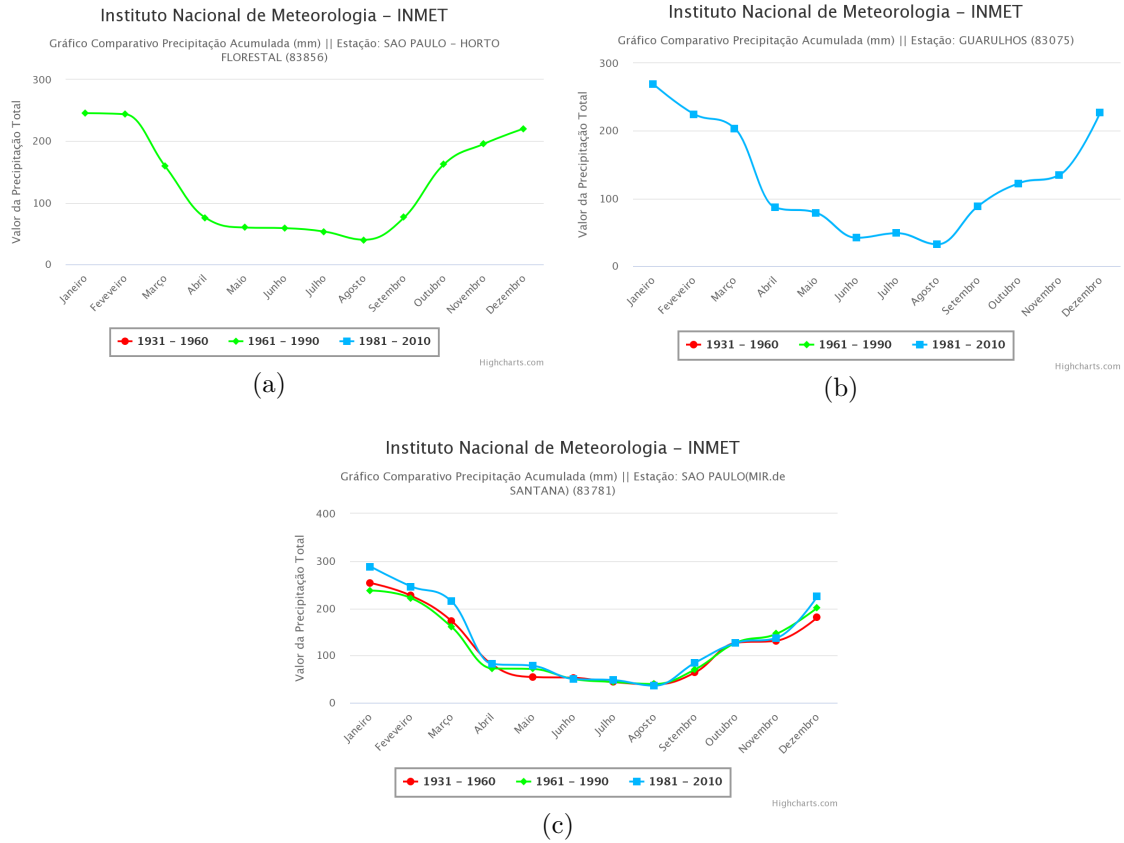
A RMSP é o polo urbano com maior concentração e geração de riqueza no cenário nacional, em 2019 o seu Produto Interno Bruto (PIB) correspondeu a aproximadamente 17 % do PIB brasileiro e a mais da metade (54 %) do PIB do Estado (<https://www.seade.gov.br/produtos2/pib-anual/>). A região abriga importantes complexos industriais, em especial nos municípios de São Paulo, Guarulhos, Osasco e no conglomerado de municípios denominado ABCD, que inclui os municípios de Santo André, São Bernardo e São Caetano do Sul e Diadema (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A - EMPLASA, 2021). A capital, São Paulo, é um dos principais polos do turismo de negócios da América Latina.

Vivem na RMSP quase 50 % da população estadual e aproximadamente 10 % da população do país, aproximadamente 21,9 milhões de habitantes, segundo estimativa do IBGE para 2020 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE., 2021). O município de São Paulo é o mais povoado do Brasil, com aproximadamente 12,3 milhões de habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE., 2021).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima na região é predominantemente subtropical com verões úmidos e quentes e invernos secos (CWA), as áreas com esta classificação usualmente encontram-se nos litorais a leste dos continentes em latitudes subtropicais. A RMSP é caracterizada por um período seco, que vai de abril até setembro, e um período chuvoso, que ocorre entre os meses de outubro e março. Vários sistemas meteorológicos influenciam o tempo em São Paulo, os principais são os eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os sistemas frontais. As ZCAS são características do verão no Hemisfério Sul enquanto as Frentes são majoritariamente no inverno. No entanto, sistemas específicos como ciclones costeiros, linhas de estabilidade e a própria circulação da brisa contribuem para a precipitação ao longo do ano (REBOITA et al., 2012).

De acordo com as Normais Climatológicas das estações de superfície do Instituto de Meteorologia (INMET) (Figura 3.3) do Horto Florestal, Guarulhos e do Mirante de Santana (as duas primeiras atualmente desativadas e todas localizadas na porção norte da RMSP) os meses de maior e menor precipitação acumulada são janeiro (acima de 235 mm) e agosto (abaixo de 40 mm), respectivamente. As normais de precipitação anual acumulada calculadas pelo INMET, considerando o período 1961 – 1990, são de 1591 mm para a estação Horto Florestal, 1558 mm para a estação de Guarulhos e de 1441 mm para a estação Mirante de Santana.

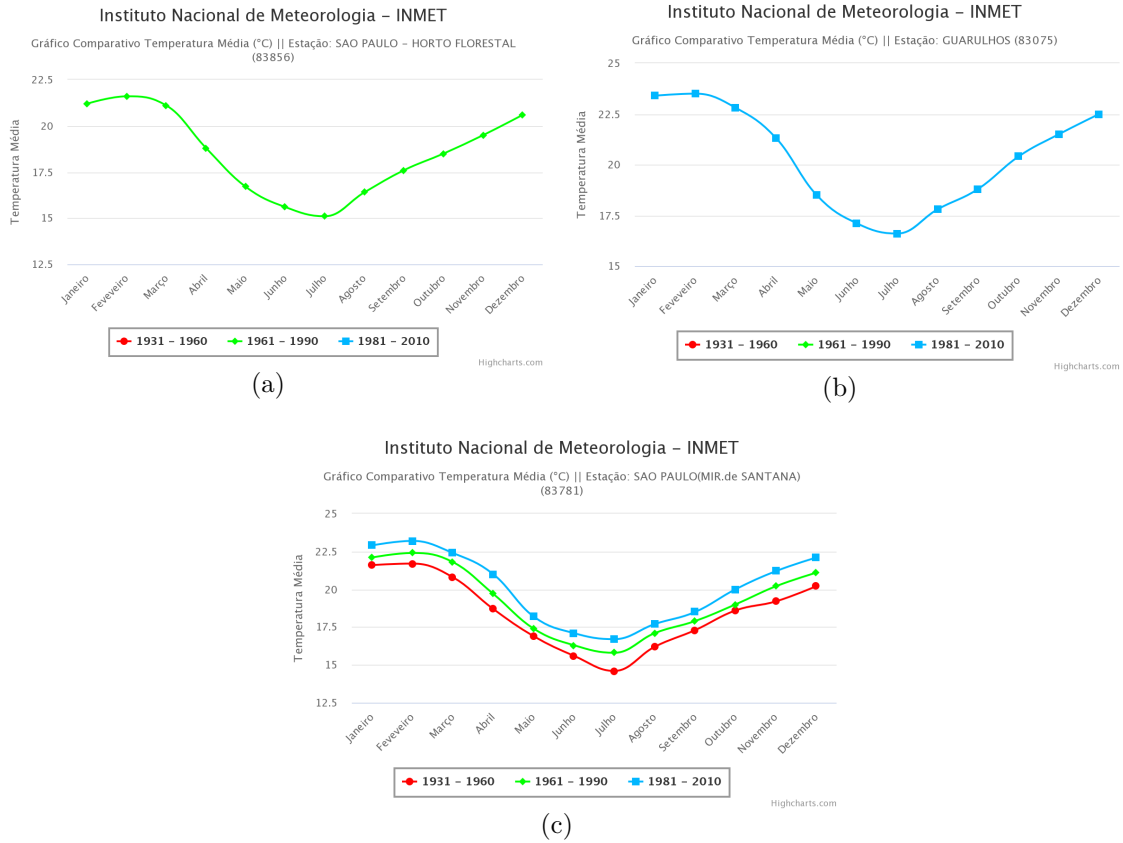
Figura 3.3 - Normais Climatológicas mensal da variável Precipitação para as estações do INMET localizadas: (a) no bairro do Horto Florestal em São Paulo (atualmente desativada), (b) no município de Guarulhos (atualmente desativada), (c) no bairro Mirante de Santana em São Paulo.



Fonte: INMET (2021).

Em relação a temperatura, os maiores valores de temperaturas máximas são registrados nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Já os menores valores de temperatura mínima são registrados nos meses de maio, junho, julho e agosto. Essas características na sazonalidade, com valores máximos observados durante o final e começo do ano e mínimos nos meses de inverno, são observadas também no ciclo anual da temperatura média (Figura 3.4). Segundo o INMET, a média da temperatura do ar anual próxima da superfície para as três estações citadas está em torno dos 19 °C <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Na estação Mirante de Santana tem-se observado um aumento das Normais Climatológicas referente à temperatura do ar média mensal na medida que se avança no tempo (Figura 3.4(c)).

Figura 3.4 - Normais Climatológicas mensal da variável Temperatura Média para as estações do INMET localizadas: (a) no bairro do Horto Florestal em São Paulo (atualmente desativada), (b) no município de Guarulhos (atualmente desativada), (c) no bairro Mirante de Santana em São Paulo.

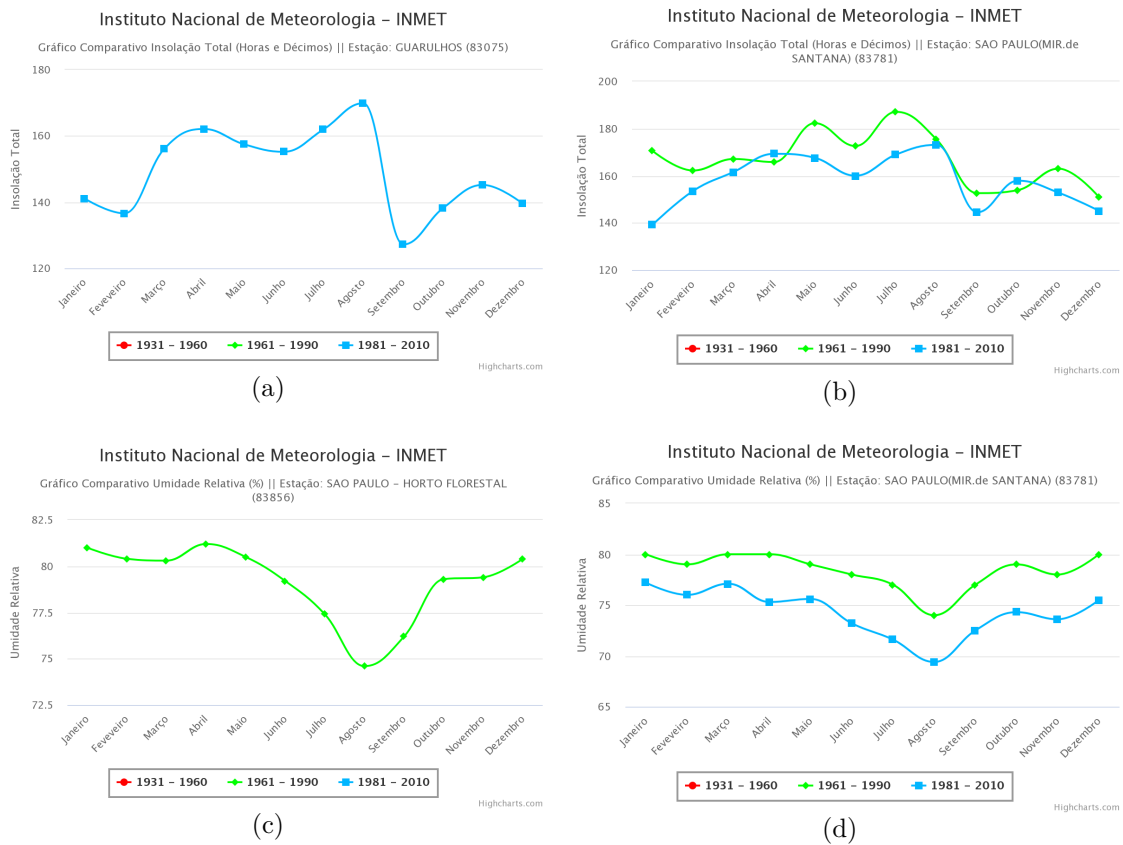


Fonte: INMET (2021).

Na Figura 3.5 são apresentados os gráficos correspondentes às Normais Climatológicas mensais para as variáveis Umidade Relativa do ar e Insolação Total. A disponibilidade simultânea de ambas as variáveis só ocorre para a estação Mirante de Santana. A média anual da umidade relativa do ar é acima de 75 % para ambas estações de superfície em que a variável é monitorada (Mirante de Santa e Horto Florestal), sendo que valores médios mensais iguais ou acima desse valor são registrados em quase todos os meses menos nos correspondentes ao inverno, quando ocorre o período seco. O mês de agosto é o que apresenta menor umidade relativa média, precisamente o mês de menor precipitação e onde as temperaturas invertem a tendência de diminuição (ver Figura 3.4).

A Normal Climatológica da variável insolação, isto é, número de horas de brilho solar, registrou valores acima de 140 horas em quase todos os meses em ambas estações com dados disponíveis. Os meses entre abril e agosto foram os que apresentaram os maiores valores médios mensais, e o contrário se observa nos meses entre setembro e março.

Figura 3.5 - Normais Climatológicas mensal das variáveis Insolação Total e Umidade Relativa. (a) Estação do INMET: Guarulhos (atualmente desativada), variável Insolação Total, (b) Estação do INMET: Mirante de Santana, variável Insolação Total, (c) Estação do INMET: Horto Florestal, variável Umidade Relativa, (d) Estação do INMET: Mirante de Santana, variável Umidade Relativa.



Fonte: INMET (2021).

3.1.2 Características da frota veicular e da malha viária.

Segundo o Departamento de Trânsito do Estado de São Paulo (DETRAN/SP) <https://www.detran.sp.gov.br/wps/portal/portaldetran/cidadao/home>, a frota de veículos licenciados no ano de 2020 para a RMSP foi de 14119072 unidades, o que corresponde a uma proporção de aproximadamente 1,6 pessoas por veículo. Desse total de unidades, a maioria pertence à categoria de automóveis, sendo estes os que mais contribuem com a poluição atmosférica na região de forma geral.

Em 2020, no município de São Paulo, com aproximadamente 8761213 de veículos, os automóveis constituíam 68 % da frota total, as motos 16 %, caminhões 1,9 % e os ônibus 0,6 % do total. Tem-se observado que, a cada ano, o número total da frota aumenta num ritmo maior que a população da região, situação causada principalmente pelo estímulo ao uso do transporte individual, principalmente pela ausência de infraestrutura relacionada com os meios coletivos de locomoção. Por exemplo, no caso do metrô, até fevereiro de 2021 haviam apenas 101,1 km de extensão na sua malha <http://www.metro.sp.gov.br/metro/institucional/quem-somos/index.aspx>.

Na Tabela 3.1 são apresentados os dados da frota total por sub-regiões, incluindo todas as categorias, e a frota de veículos pesados para o ano 2017, de interesse nesta pesquisa. O município de São Paulo possui mais de 60 % da frota total da RMSP e aproximadamente 58 % dos veículos pesados. A sub-região Norte é a que possui a menor quantidade de veículos licenciados, sendo que, do total da RMSP, só 1,8 % pertence a esta região. Já a sub-região Sudeste, é a segunda maior em quantidade de veículos (13,5 % do total). Quando analisada a contribuição relativa da frota de veículos pesados de cada sub-região em relação ao total de veículos pesados na RMSP se observa que estes valores são maiores que a contribuição relativa da frota total em cada sub-região em relação ao total para a RMSP para todas as sub-regiões, exceto para a sub-região Sudeste e para o município de São Paulo.

Tabela 3.1 - Quantidade de unidades que compõem a frota total e a frota de veículos pesados nas sub-regiões da RMSP. Ano 2017.

Frota/Região	Norte	Leste	Sudeste	Sudoeste	Oeste	Município São Paulo
Frota Total	233624	1378902	1745693	542561	1012208	8036824
Veículos pesados	26022	157098	162487	63342	105614	717857

Fonte: Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) (2021).

A importância dos veículos pesados está na sua alta contribuição para a emissão do material particulado, que é relevante nesta pesquisa. Se analisada a contribuição relativa da frota de veículos pesados e a de veículos não pesados nas emissões por espécie é possível entender melhor essa afirmação. A seguir é apresentada a contribuição relativa dos veículos pesados nas emissões de poluentes na RMSP:

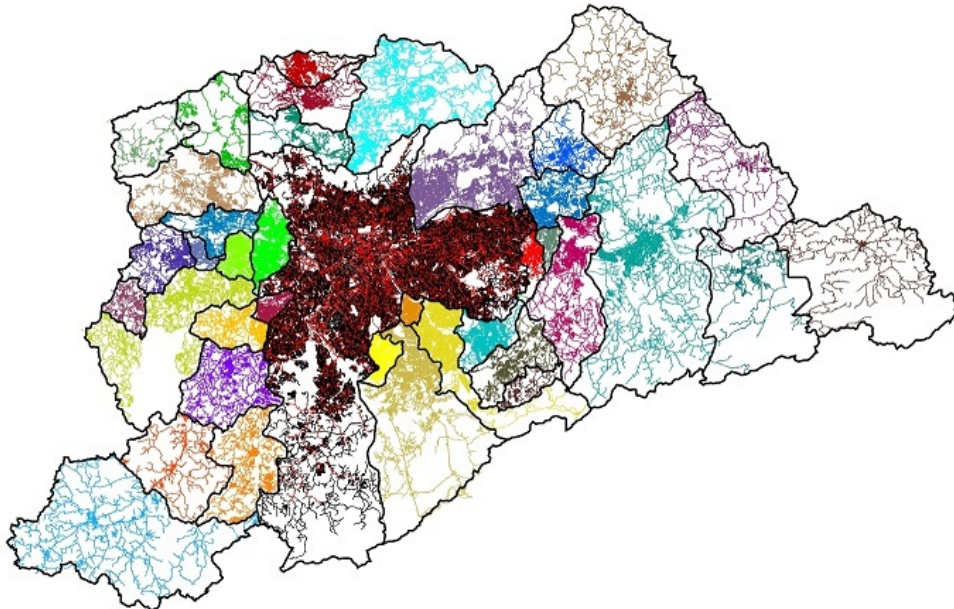
- para o CO, a emissão dos veículos pesados representa aproximadamente 5,5 % do total da emissão veicular,
- para os HC, os veículos pesados emitem aproximadamente o 6 % do total,
- para o NO_x, os veículos pesados emitem aproximadamente o 70 % do total e
- para o MP, os veículos pesados emitem aproximadamente o 80 % do total.

Em relação à malha viária, esta é bastante desenvolvida na RMSP, no entanto ainda faltam investimentos e melhor planejamento para conseguir acompanhar o aumento da frota numa região tão dinâmica. Atualmente, a competição pelo espaço na rua é preocupante, ocorrendo com frequência grandes engarrafamentos, especialmente quando ocorrem eventos meteorológicos associados a precipitação intensa. Há um número significativo de vias na RMSP, no entanto existem algumas de maior importância pelo acúmulo de veículos que diariamente transitam nelas, exemplos são as Marginais Tietê e Pinheiros (consideradas como vias principais ou arteriais do município de São Paulo). Grandes rodovias também fazem parte do sistema viário da região, como exemplos podem ser citadas a Rodovia Presidente Dutra, a Fernão Dias, a Ayrton Senna, a dos Imigrantes, a Anhanguera e a dos Bandeirantes. Outra importante via que vem sendo construída a vários anos com a finalidade de aliviar o tráfego de veículos pesados que cruzam as marginais mencionadas é o Rodoanel Mário Covas, também conhecido como Rodoanel Metropolitano de São Paulo. Faltando só o trecho norte, que deve ser entregue em 2023, esta via terá aproximadamente 180 km com duas pistas e seis faixas. A essas vias de maior importância se somam as locais que são maioria em todos os municípios. Embora insuficiente para a frota total da região, a malha viária da RMSP é uma das maiores e mais complexas no mundo.

Dentro da RMSP destaca-se o município de São Paulo por apresentar o maior número de vias na região. Também se destacam o município de Guarulhos e os localizados na sub-região Sudeste. Já as sub-regiões Leste e Sudoeste possuem uma quantidade menor de vias nos seus municípios.

Foi possível encontrar informação sobre as vias em várias fontes diferentes, entre as mais completas e atuais estão as obtidas no Centro de Estudos da Metrópole (CEM) <http://web.fflch.usp.br/centrodametropole>, com dados correspondentes ao ano de 2018 de todos os logradouros da RMSP. Na Figura 3.6 é mostrada a informação sobre a malha viária que disponibiliza o CEM e que foi utilizada neste trabalho (ver Capítulo 6) para o seu uso no aprimoramento das emissões veiculares nos municípios da RMSP.

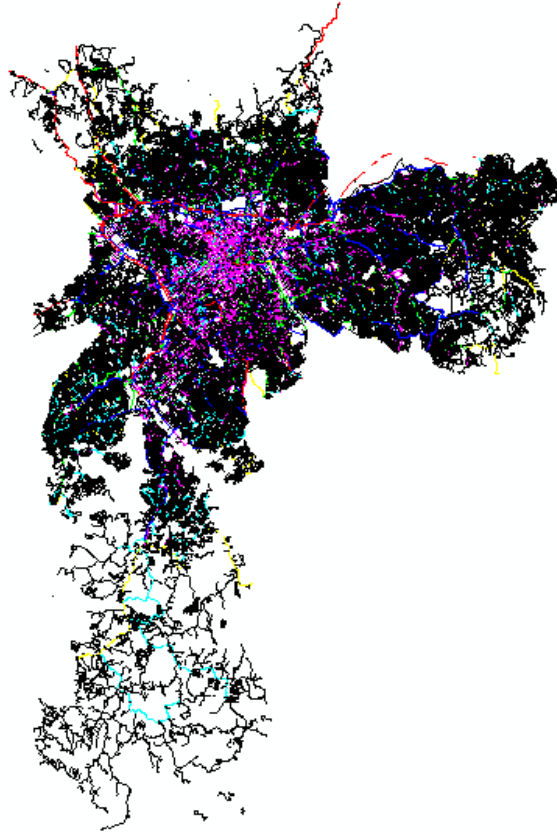
Figura 3.6 - Malha viária da RMSP com os seus 39 municípios destacados por diferentes cores.



Fonte: Centro de Estudos da Metrópole (2021).

Para o município de São Paulo foi utilizada a informação disponibilizada pela Prefeitura, especificamente pela Secretaria de Transporte. Esses dados estão mais completos que os do CEM e melhor caracterizados, o que constitui um ponto favorável dada a importância das vias do município capital, onde circulam um elevado número de veículos e com participação majoritária na emissão de poluição veicular na RMSP (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Malha viária do município de São Paulo. As cores indicam tipos de vias diferentes.



Fonte: Secretaria de Transporte da Prefeitura de São Paulo (2017).

3.2 Observações meteorológicas e da química da atmosfera.

Nas etapas de avaliação, validação, calibração e análises que foram realizadas no decorrer desta pesquisa, e que serão detalhadas posteriormente, a utilização de dados observados nas diferentes estações espalhadas pela RMSP foi de suma importância, tanto as variáveis meteorológicas como aquelas que caracterizam a composição química e a qualidade do ar. Assim como os dados das estações, foram também empregados outros relacionados com a variável precipitação provenientes do processamento da informação obtida a partir de sensores presentes nos satélites dedicados ao monitoramento da atmosfera. Nos próximos dois subtópicos é feita uma descrição detalhada das fontes e características dos dados medidos e estimados que foram utilizados neste trabalho.

3.2.1 Estações de superfície.

Para a presente pesquisa foram utilizados dados das estações de superfície das redes do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE), da CETESB e do INMET, além da da estação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), localizada no Parque do Estado. Para o caso da precipitação, fundamental neste trabalho, também foram usados dados da rede de pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

- Rede do CGE:

Consistem de estações automáticas espalhadas principalmente pelo município de São Paulo e que fornecem dados, a cada minuto, de temperatura, pressão atmosférica, velocidade do vento, umidade relativa do ar, índices pluviométricos, etc (<https://www.cgesp.org/v3/fontes-de-informacao.jsp>). No caso da estação localizada no córrego do Itaim, apenas dados precipitação encontram-se disponíveis nos períodos de estudos aqui utilizados (ver item 3.3). Os dados brutos disponibilizados para a pesquisa continham informação de acumulado diário com intervalos a cada 10 min e utilizam horário UTC (do *inglês Universal Time Coordinated*) com a precipitação zerando às 10 UTC de cada dia. Foram utilizadas 32 estações (na Figura 3.21 estão contidos os nomes de todas as estações), sendo 29 dentro do município de São Paulo e 3 em outros municípios da RMSP (1 em Santana de Parnaíba, 1 em São Bernardo do Campo e outra em Mauá). Na Figura 3.8 é possível observar a localização destas estações, uma densidade maior das mesmas é percebida na região central do município de São Paulo.

- Rede de estações da CETESB:

A CETESB possui uma rede de estações automáticas e manuais, tanto fixas como móveis, espalhadas por todo o Estado de São Paulo com o objetivo de monitorar a qualidade do ar nas diferentes regiões e facilitar a toma de decisões das autoridades quando os padrões de qualidade forem ultrapassados ou apresentem níveis que prejudiquem a saúde pública. As estações são focadas no registro de variáveis relacionadas diretamente com a química da atmosfera (exemplo: concentrações de gases poluentes como os NO_x , O_3 , e CO , concentrações de MP e HC), também, dependendo da estação, são registrados dados de variáveis puramente meteorológicas como pressão atmosférica, radiação solar, direção do vento, umidade relativa e temperatura. Nenhuma das estações da CETESB registra dados de precipitação.

Os dados brutos utilizados consistiram de valores médios horários considerando o horário de Brasília (<https://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar>). Neste trabalho foram utilizados os dados registrados por 29 estações automáticas da CETESB (na Figura 3.21 estão contidos os nomes de todas as estações), quase a totalidade das que se encontram localizadas dentro da RMSP (ver Figura 3.8).

- Rede de estações do INMET:

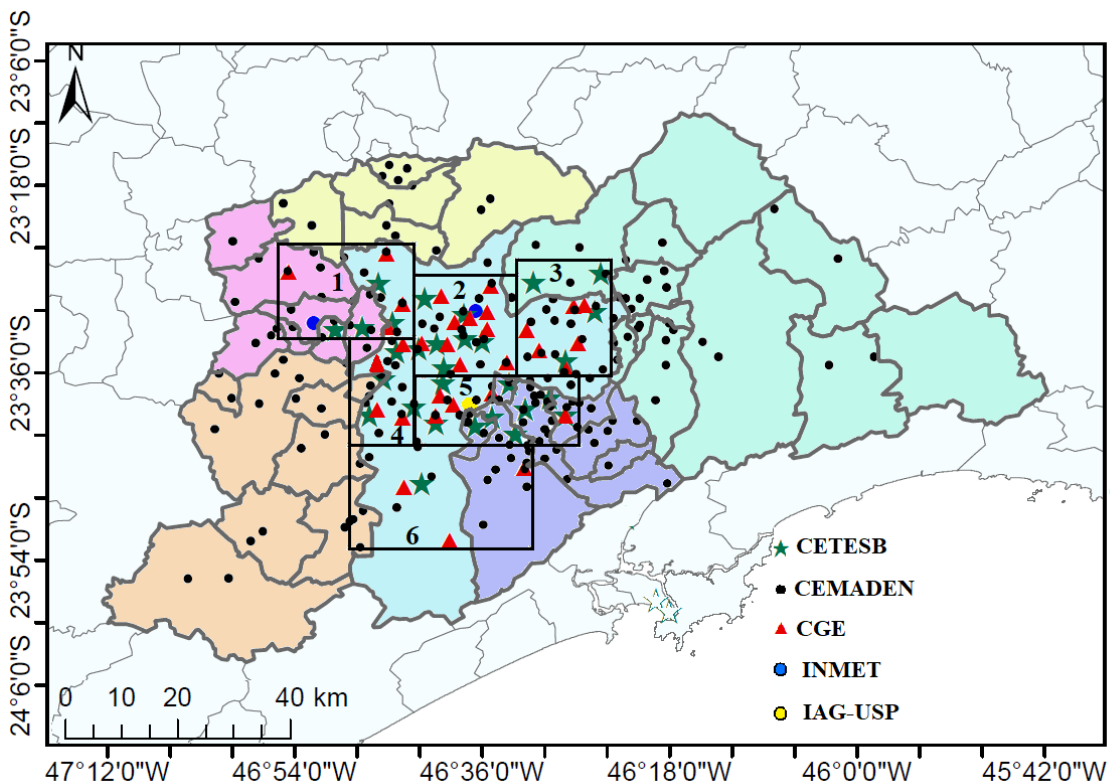
O INMET possui uma ampla rede de estações automáticas e convencionais distribuídas por todas as regiões do Brasil. Estas estações registram dados de diferentes variáveis meteorológicas que são disponibilizados de forma gratuita e em tempo real no site do instituto (<http://www.inmet.gov.br>). Os dados são de hora em hora e utilizam o horário UTC. As estações do INMET localizadas na RMSP e que possuem dados históricos para o período de estudo são: Mirante de Santana (convencional - N° 83781) e a estação de Barueri (Automática – No A755). Uma outra estação utilizada, que não pertence diretamente ao INMET, mas tem seus dados disponibilizados também pelo site do Instituto de Meteorologia, é a estação convencional do IAG-USP (N° 83004). Os dados desta última também podem ser adquiridos mediante solicitação endereçada à administração da estação (<http://www.estacao.iag.usp.br/>). A localização das três estações, as do INMET e a do IAG/USP pode ser observada na Figura 3.8.

- Dados da rede de pluviômetro do CEMADEN:

O CEMADEN possui uma ampla rede de pluviômetros automáticos espalhados por todo Brasil, que servem para o monitoramento da quantidade e intensidade das chuvas, isso com o particular interesse em monitorar aquelas que possam deflagrar deslizamentos de terra, inundações e enxurradas. Além disso, esses dados podem ser utilizados no processo de assimilação dos modelos hidrológicos e geodinâmicos que são utilizados para previsão de vazão – nível do rio e fator de segurança para estabilidade de encostas (<http://www.cemaden.gov.br/pluviometros-automatiko/>). Os valores brutos da precipitação medidas nas estações são disponibilizados no site do centro (<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>). O horário UTC é empregado nos dados, e como especificado no próprio site, os dados não passaram por nenhum tratamento, o que fez necessária uma validação dos mesmos. Os arquivos disponibilizados contêm informação de acumulados para intervalos de tempos irregulares que dependem da intensidade da precipitação, sendo intervalos menores para intensidade maior e maiores para precipitação de fraca intensidade.

Neste trabalho, depois de tratados de forma objetiva, foram utilizados dados de 193 pluviômetros da rede do CEMADEN localizados na RMSP. O único município, de um total de 39, que não tem dados pluviômetros disponíveis para o período de estudo é Santa Isabel na sub-região leste, Guararema possui um na divisa com Biritiba-Mirim. Na Figura 3.8 é apresentada a distribuição geográfica dos pluviômetros empregados nesta pesquisa.

Figura 3.8 - Localização, dentro da RMSP (linhas mais escuras são os limites dos 39 municípios que compõem a região), das estações do CGE (triângulos vermelhos), da CETESB (estrelas verdes), do INMET (círculos azuis), da estação do IAG-USP (círculo amarelo) e dos pluviômetros do CEMADEN (círculos menores negros). Os retângulos sobre a RMSP indicam subáreas específicas utilizadas na validação do modelo, mais detalhes no Item 3.6.1. Os dados de localização foram disponibilizados pela CETESB, o CGA e o INMET.



Fonte: Produção do autor.

3.2.2 Produtos de estimativas de precipitação por satélite de alta resolução. Caracterização.

Nas últimas décadas, várias tecnologias foram desenvolvidas para melhorar o monitoramento da atmosfera e aumentar o conhecimento sobre as condições do tempo ao redor do planeta. Entre as tecnologias desenvolvidas, destaca-se os sensores e os algoritmos associados que permitem estimar precipitação a partir de satélites. Uma missão espacial conjunta entre a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos da América (NASA, pelas suas siglas em inglês) e a Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão (JAXA pelas suas siglas em inglês), conhecida como the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), permitiu, no final da década dos 90, monitorar e estudar a precipitação tropical e extratropical usando 5 instrumentos: *Precipitation Radar* (PR), *TRMM Microwave Imager* (TMI), *Visible Infrared Scanner* (VIRS), *Clouds Earths Radiant Energy System* (CERES) e *Lightning Imaging Sensor* (LSI). Os produtos dessa missão mais utilizados são as estimativas de precipitação média mensais e diárias, que são disponibilizadas com uma resolução de $0,25^\circ$ e na região compreendida entre 50° N e 50° S, e estão disponíveis para o período entre 1998 e o presente.

Em 2014 foi lançada a missão *Global Precipitation Measurement*, com sensores avançados de precipitação do *dual-frequency precipitation radar* (DPR) com a banda Ka/Ku (35.5 e 13.6 GHz, respectivamente) e o *GPM microwave imager* (GMI) com multifrequência (10-183 GHz) (HUFFMAN et al., 2007). Foram estes sensores que permitiram o desenvolvimento de diferentes metodologias ao redor do mundo para estimar a precipitação em diferentes escalas espaciais e temporais. Surgiram assim diferentes conjuntos de dados de precipitação estimada, cada um com suas características específicas. No Brasil, o trabalho de Rozante et al. (2010) apresentou o produto MERGE que consiste em combinar a precipitação observada nas estações em superfície com estimativas de precipitação por satélite provenientes da TRMM. Em 2020 foi lançada uma atualização da metodologia e foram disponibilizados dados processados a partir de 2010 empregando os dados do *Global Precipitation Measurement Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG) (HUFFMAN et al., 2015a; HUFFMAN et al., 2015b), que contêm mais informações. No entanto, o domínio e a resolução do produto foram mantidos iguais aos da versão anterior (Tabela 3.2). Na nova versão, também foi feita a inclusão de cerca de 2500 dados observados a mais do que na versão anterior, e se efetuou a remoção do viés das estimativas de precipitação oriundas de satélite.

São vários os conjuntos de dados de precipitação estimada por satélite disponíveis para pesquisas no Brasil. Recentemente, Afonso et al. (2020) avaliaram produtos de estimativas de precipitação por satélite de alta resolução dos algoritmos do *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP), *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* e o algoritmo do *Climate Prediction Center* (CPC) denominado *Morphing Technique* (CMORPH), na representação do Ciclo Diurno da Precipitação (CDP) sobre o Brasil durante o período de 2014-2018. Como principal resultado demonstraram que, em geral, o GSMaP na sua versão calibrada apresenta melhor desempenho em todas as regiões, exceto para chuvas associadas a sistemas convectivos tropicais intensos na Amazônia.

No processo de avaliação, validação e calibração realizados no presente trabalho de pesquisa (ver Item 3.6 foram utilizados os seguintes produtos: MERGE (ROZANTE et al., 2010) na sua versão de 2020 (<http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM>); o GSMaP (KUBOTA et al., 2007), disponibilizado pelo JAXA (<http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>); versão calibrada do GSMaP (doravante GSMaP-C) (MEGA et al., 2014); GPM_3IMERGHH (TAN et al., 2019) (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary) e o TRMM_3B42RT (GEBREMICHAEL et al., 2010) (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42RT_7/summary), ambos disponibilizados pela NASA assim como o CMORPH (JOYCE et al., 2004), disponibilizado pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) - *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov>).

Na versão calibrada do GSMaP, o produto GSMaP-Gauge ajusta a versão do algoritmo GSMaP-MKV (*Motion Kalman Vectors*) com dados diários da análise global de pluviômetros do CPC *Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation* da NOAA (AFONSO et al., 2020). Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características dos produtos de precipitação que foram utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.2 - Características dos produtos de precipitação que foram utilizados nesta pesquisa. A calibragem refere-se à utilização de dados registrados nas estações em superfície para melhorar o produto final.

Produtos	Domínio disponível	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Calibração (utilizando dados das estações)
MERGE	13°N - 57°S 82°O - 33°O	0.25° x 0.25°	1 hora	SIM
GSMaP	50°N - 50°S	0.1° x 0.1°	1 hora	NÃO
GSMaP-C	50°N - 50°S	0.1° x 0.1°	1 hora	SIM
GPM_3IMERGHH	90°N - 90°S 180°O - 180° L	0.1° x 0.1°	30 minutos	SIM
TRMM_3B42RT	60°N - 60°S 180°O - 180° L	0.25° x 0.25°	3 horas	NÃO
CMORPH	60°N-60°S	0.08° x 0.07°	30 minutos	NÃO

3.3 Casos de estudo. Definição e características.

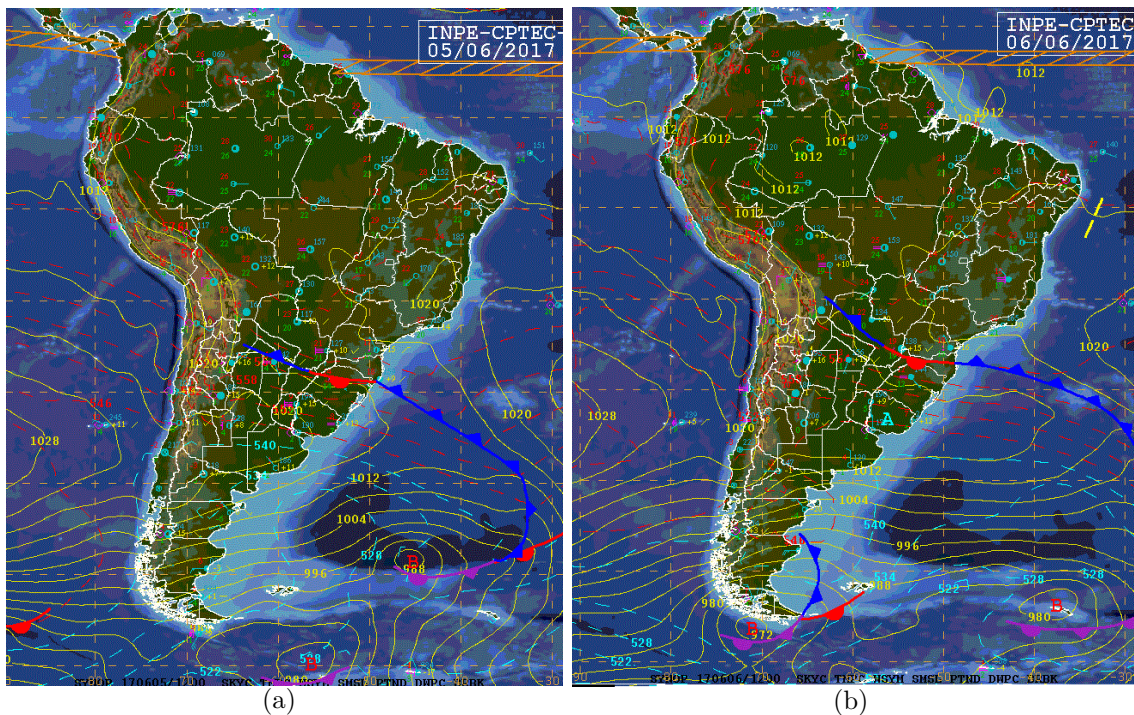
Para o cumprimento dos objetivos propostos, foram selecionados para estudo dois casos onde se registaram valores significativos de precipitação na Região Metropolitana de São Paulo. Ambos casos foram classificados como eventos extremos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). O caso 01 para esta pesquisa ocorreu em junho (período seco na RMSP, ver I3.1) e o caso 02 no mês de fevereiro (período chuvoso na RMSP), ambos no ano de 2017, ano caracterizado por apresentar uma fase neutra em relação ao El Niño Oscilação Sul (ENOS) (<https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/>). A seguir é feita a descrição meteorológica detalhada de ambos casos .

3.3.1 Caso 01: 5 e 6 de junho 2017.

O caso 01 ocorreu nos dias 5 e 6 de junho de 2017, acumulados significativos de precipitação foram registrados em várias estações da RMSP entre as 12:00 UTC do dia 05 e as 15:00 UTC do dia 06. Segundo o INMET, a Normal Climatológica da precipitação (obtida considerando o período 1981 – 2010) para junho, na região, varia entre 55 e 75 mm (https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual). Na maioria das estações, os valores de precipitação registrados durante o evento foram dentro desse intervalo, o que significa que em aproximadamente 27 horas choveu o esperado para o mês. Em várias estações os valores registrados ficaram acima da Normal Climatológica, podem ser citados como exemplos: Caucaia do Alto no município de Cotia com 96 mm, Butantã em São Paulo com 83 mm, Vila Santa Rita em Itapevi com 99 mm, Jardim Betânia em Vargem Grande Paulista com 98 mm e Jardim Paulistano em São Paulo com 81 mm (todos pluviômetros da rede do CEMADEN). Em algumas estações nos municípios de Cotia, São Roque e Cabreúva (os dois últimos na fronteira com a RMSP), os valores registrados de precipitação no período de 1 hora representaram quase a metade do esperado para todo o mês. Vários pontos de alagamentos, quedas de árvores e deslizamentos de terra foram registrados na cidade de São Paulo, segundo o site de notícias G1 (<http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/em-24h-chove-quase-o-esperado-para-o-mes-de-junho-diz-cge.ghtml>), a capital entrou em estado de atenção na madrugada do dia 07 de junho.

Ao analisar a carta sinótica de superfície das 12:00 UTC do dia 05 (ver Figura 3.9(a)), observa-se um sistema frontal com ramo estacionário entre o nordeste da Argentina, norte do Rio Grande do Sul e o Oceano Atlântico adjacente. Este sistema frontal está associado a um centro de baixa pressão de 988 hPa situado, aproximadamente, em 48°S/46°W. Na carta das 12:00 UTC do dia 06 de junho Figura 3.9(b)), o ramo estacionário atua desde o Paraguai e Santa Catarina e se estende com o ramo frio pelo Atlântico adjacente até o centro de baixa pressão relativa 1008 hPa, em torno de 39°S/29°W. Esta configuração é característica do final de outono e começo do inverno, quando vários sistemas frontais atravessam a região Sul e Sudeste do Brasil podendo provocar chuvas intensas em várias localidades.

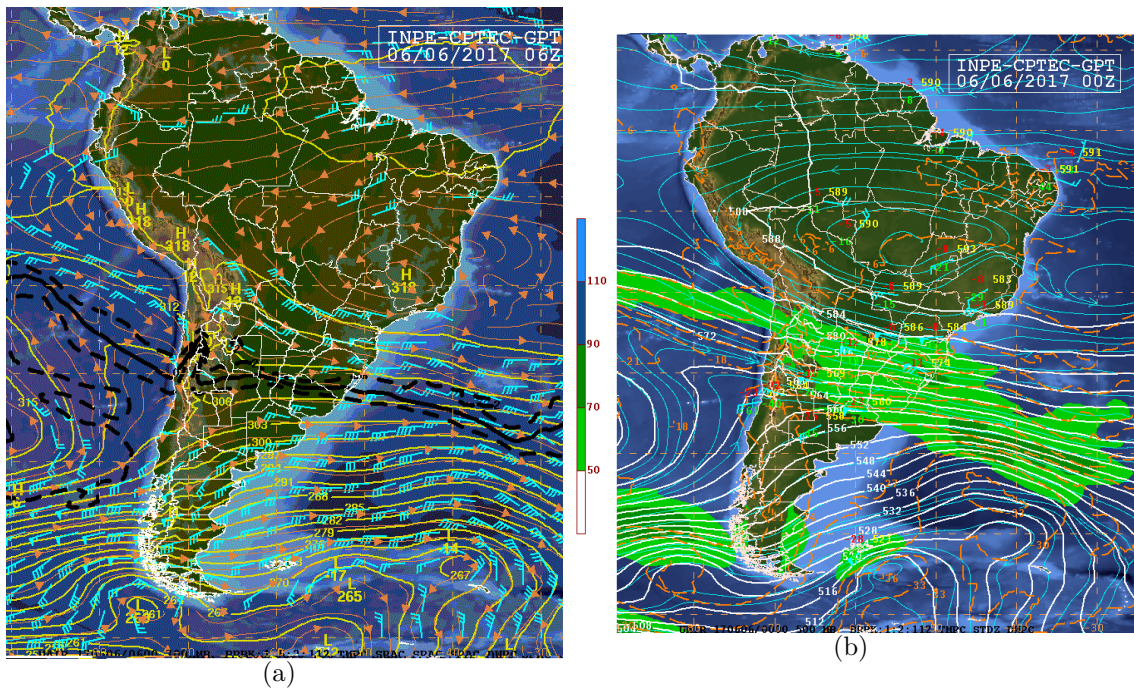
Figura 3.9 - Cartas sinóticas de Superfície. (a) Horário 12:00 UTC do dia 05/06/2017, (b) Horário 12:00 UTC do dia 06/06/2017.



Fonte: CPTEC (2021).

Na carta sinótica de 700 hPa (Figura 3.10(a)) observa-se um escoamento de noroeste associado ao Jato de Baixos Níveis (JBN) atuando entre a região Sul do Brasil e o sul do Estado de São Paulo, dando suporte para o transporte de umidade na região. O sistema frontal propiciou assim o alinhamento da convergência formando uma banda de alto conteúdo de água precipitável que ficou entre o Sudeste, Centro-Oeste e chegando até a região Norte do Brasil. O escoamento em níveis médios (Figura 3.10(b)) foi mais zonal, mas com presença de perturbações ciclônicas de onda curta passando sobre a região entre porção leste do Estado de São Paulo e o litoral paulista, que favoreceram a convecção e, junto com a divergência de massa em altos níveis, contribuíram para a intensificação e desenvolvimento vertical dos núcleos convectivos sobre a RMSP.

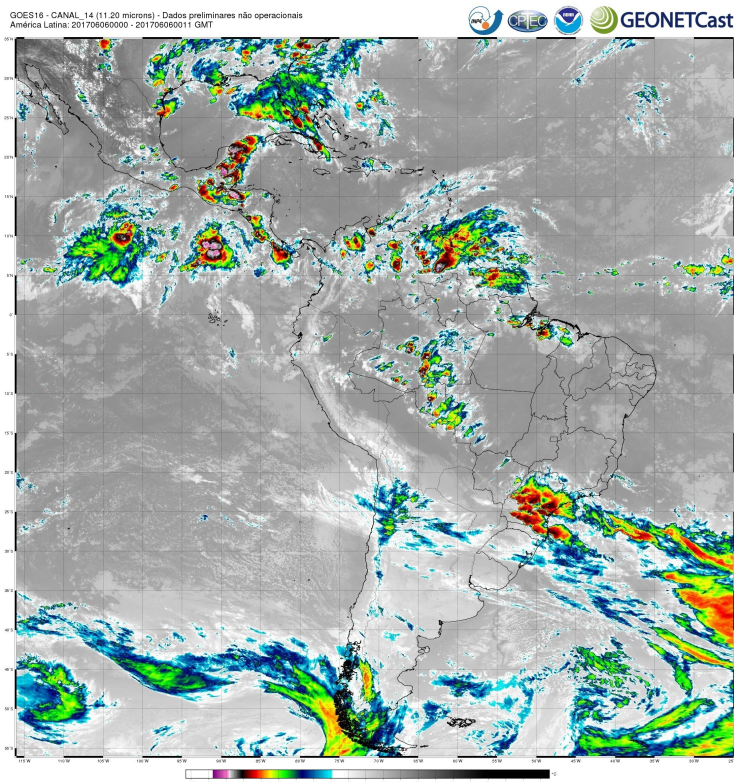
Figura 3.10 - (a) Carta Sinótica de 700 hPa, dados das 06:00 UTC do dia 06/06/2017, (b) Carta Sinótica de 500 hPa, dados das 00:00 UTC do dia 06/06/2017.



Fonte: CPTEC (2021).

A Figura 3.11 apresenta imagem do canal 14 (11,20 microns) do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-16) da NOAA das 06:00 UTC do dia 06 de junho. Nela é possível identificar a banda de nebulosidade associada ao avanço do sistema frontal cobrindo boa parte do Estado de São Paulo. Um núcleo com baixa temperatura de brilho (menor que $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que indica um desenvolvimento vertical maior da nuvem, está localizado próximo da RMSP. Em geral, sobre a RMSP predominam temperaturas de brilho menor que $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ indicando a presença de nuvens profundas com potencial para desencadear tempestades.

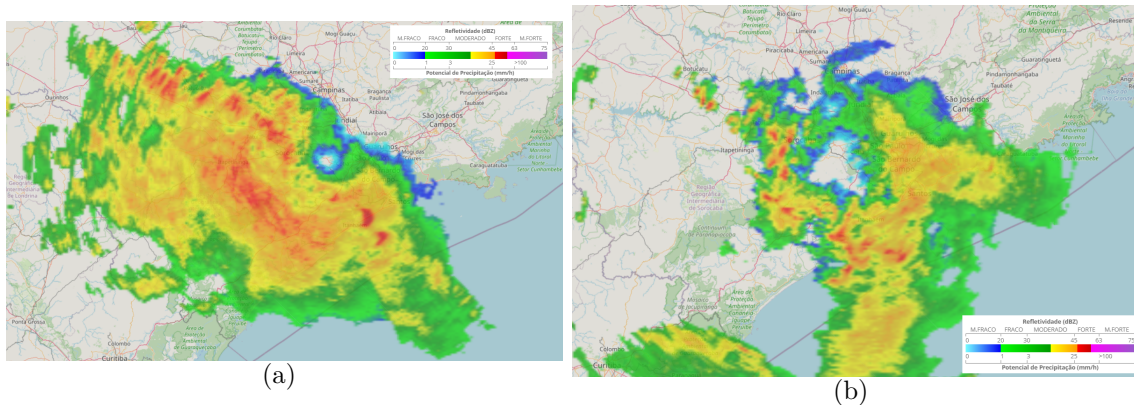
Figura 3.11 - Imagem do Canal 14 do satélite GOES-16 (06:00 UTC do dia 06/06/2017).



Fonte: DSA/CPTEC (2021).

Imagens do radar de São Roque, no Estado de São Paulo, cobrindo a totalidade da RSMP, são apresentadas na Figura 3.12. A imagem à esquerda corresponde à chegada da linha pré-frontal ao extremo oeste da região metropolitana às 12:00 UTC do dia 05 de junho. Já na imagem à direita, para o dia 06 de junho às 06:00 UTC, são observados vários núcleos convectivos. Em ambos os casos, estão presentes áreas de elevada refletividade, com alguns picos localizados sobre municípios da RMSP.

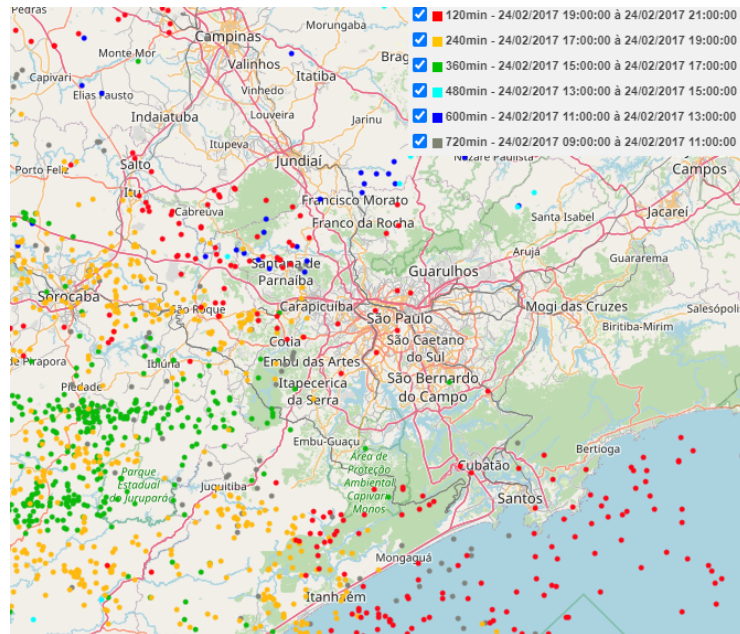
Figura 3.12 - Imagens de refletividade do radar de São Roque no Estado de São Paulo.
(a) 05/06/2017 às 12:00 UTC, (b) 06/06/2017 às 06:00 UTC.



Fonte: REDEMET (2021).

As descargas atmosféricas constituem evidência importante da intensidade das tempestades. Analisando o registro de descargas, tanto as de nuvem solo como as intra-nuvem, detectadas pela Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), durante o período em que a chuva significativa foi registrada, observou-se que as sub-regiões da RMSP mais afetadas foram a Oeste, Sudoeste e Norte. Algumas descargas ocorreram no centro da capital do Estado e praticamente nenhuma nas sub-regiões Leste e Sudeste. Comparando e analisando as Figuras 3.12(b) e 3.13, é possível concluir que os núcleos convectivos mais intensos, com maior desenvolvimento vertical, estiveram principalmente nas porções oeste e noroeste do município de São Paulo, precisamente onde maior quantidade de descargas e picos de refletividade foram registrados.

Figura 3.13 - Descargas atmosféricas (Nuvem Solo e Intranuvem) registradas pela RIN-DAT no período entre as 09:00 HL do dia 05/05/17 e as 21:00 HL do dia 06/06/2017.



Fonte: Núcleo de Monitoramento e Previsão de Descargas Atmosféricas (2021).

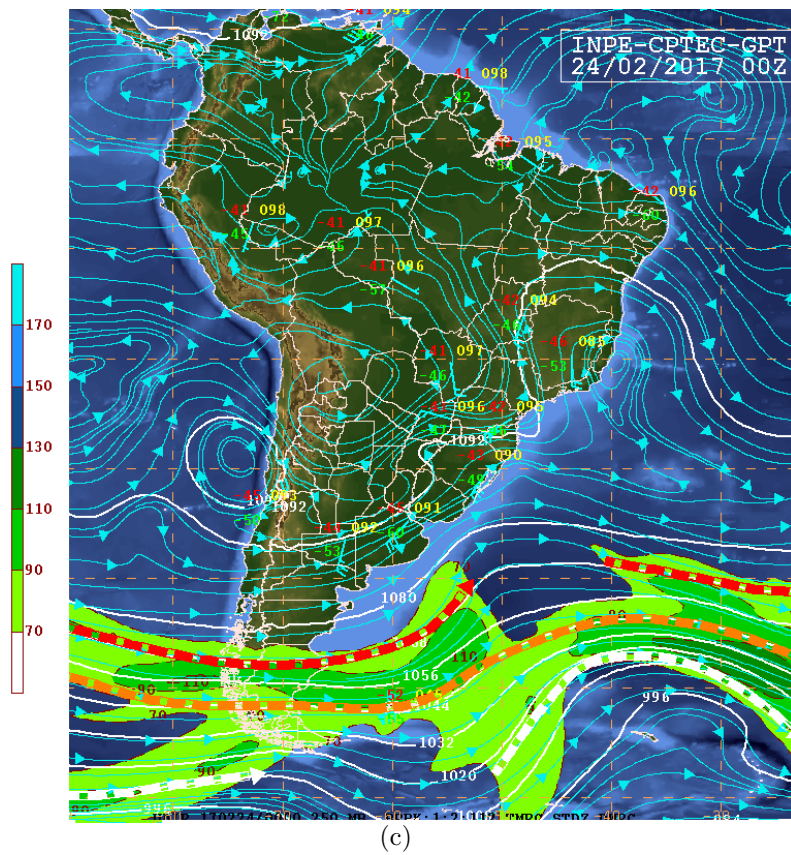
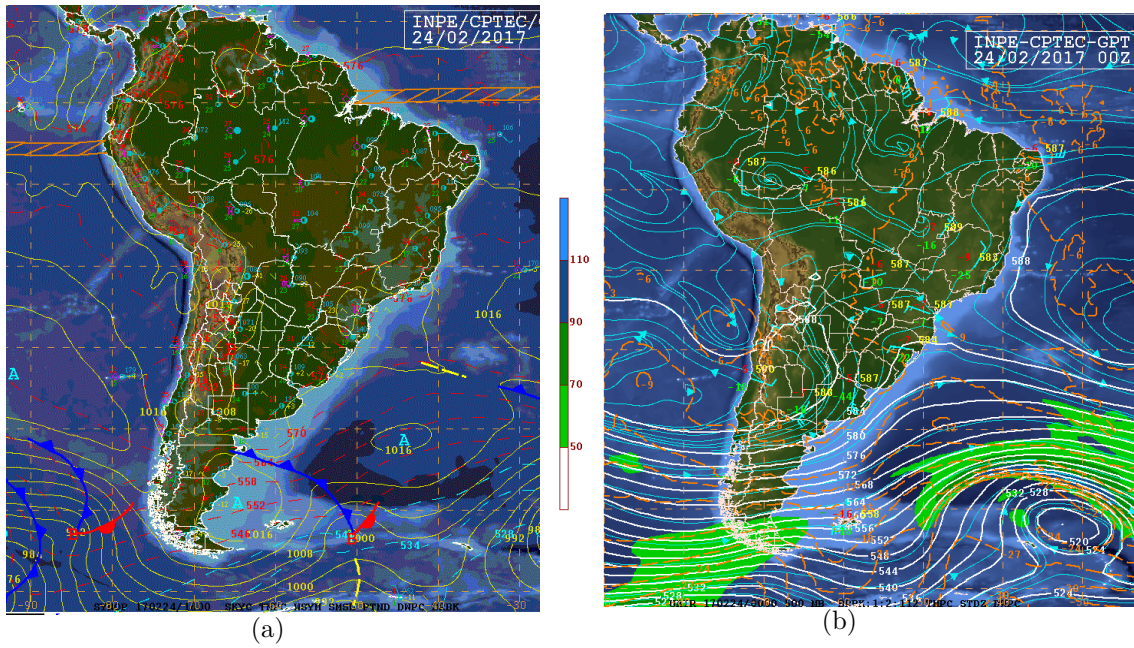
3.3.2 Caso 02: 24 e 25 de fevereiro 2017.

O caso 02 ocorreu no dia 24 de fevereiro de 2017 durante a tarde e a noite, acumulados de precipitação significativos foram registrados em várias estações da RMSP entre as 15:00 UTC do dia 24 e as 00:00 UTC do dia 25 de fevereiro. Foram 9 horas de chuva intensa, que ocasionaram problemas nos circuitos elétricos, quedas de árvores, danos em infraestruturas e um intenso engarrafamento no final da noite. Dois dias antes já tinha acontecido um evento de precipitação, também intensa, em parte da RMSP, pelo que o solo ficou saturado favorecendo ainda mais as inundações e deslizamentos. O evento ocorreu na mesma semana em que os termômetros marcaram um dos dias mais quentes do verão paulistano, dia 19 de fevereiro (34,6 °C).

Segundo o INMET, a Normal Climatológica da precipitação (obtida considerando o período 1981 – 2010) para fevereiro, na região, varia entre 200 e 250 mm (https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual), valores relativamente altos associados ao período chuvoso. Várias estações do CEMADEN registraram valores de acumulados de precipitação acima de 70 mm, o que representa 1/3 do esperado para o mês, como exemplos podem ser citadas as estações Centro no município de São Caetano do Sul com 71 mm, Taboão e Centro em Diadema com 80 mm e 99 mm, respectivamente, Rudge Ramos em São Bernardo do Campo com 84 mm e Santa Terezinha em Santo André com 72 mm. Todas as estações mencionadas ficam na sub-região Sudeste da RMSP. Algumas estações, como a do IAG-USP em São Paulo e Ruge Ramos em São Bernardo do Campo, registraram valores acumulados, no período de uma hora, acima de 55 mm.

A carta sinótica de superfície (Figura 3.14(a)), das 18:00 UTC do dia 24/02, mostra um anticiclone pós-frontal localizado sobre o Atlântico e com valor de pressão de 1016 hPa. A presença de um cavado em superfície a leste da região Sul do Brasil, como reflexo de cavados em níveis superiores, fortalece a convergência dos ventos úmidos no leste do continente. Já na carta de 500 hPa (Figura 3.14(b)) das 00:00 UTC do dia 24, o avanço de um cavado não frontal sobre o sul da região Sudeste do Brasil propiciou o aumento da instabilidade no centro e no sul do Estado de São Paulo.

Figura 3.14 - (a) Carta Sinótica de superfície, dados das 18:00 UTC do dia 24/02/2017, (b) Carta Sinótica de 500 hPa, dados das 00:00 UTC do dia 24/02/2017, (c) Carta Sinótica de 250 hPa, dados das 00:00 UTC do dia 24/02/2017.

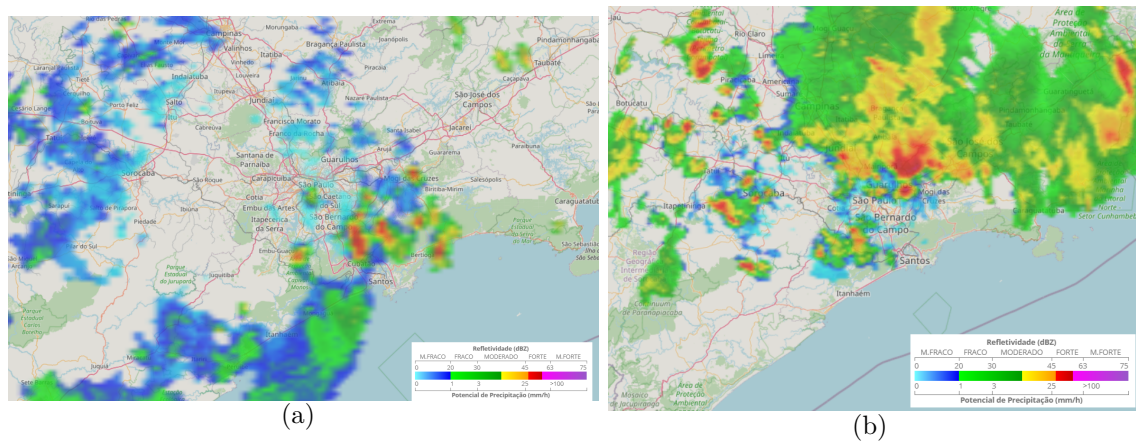


Fonte: CPTEC (2021).

Na carta de 250 hPa (Figura 3.14(c)), das 00:00 UTC, a presença de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) atuando sobre o Espírito Santo também contribuiu para instabilizar o tempo, principalmente, sobre parte do Sudeste, com destaque para o leste de São Paulo, e Centro-Oeste do Brasil. O conjunto desses sistemas sinóticos, aliados à termodinâmica e cisalhamento do vento na coluna vertical, deixaram as condições favoráveis para a ocorrência de tempestades intensas e pancadas de chuva típicas de verão sobre a RMSP, entre a tarde e a noite do dia 24 de fevereiro. A brisa marítima teve um papel fundamental como mecanismo de disparo da convecção.

A Figura 3.15 mostra imagens de refletividade associadas ao radar São Roque para momentos diferentes dentro do período em que se registrou chuva significativa, é possível identificar vários núcleos convectivos ao redor da RMSP. Na imagem das 15:00 UTC, os núcleos estão localizados mais a sudeste, onde a Serra do Mar pode ter tido um papel importante no processo de convecção. Esses núcleos, posteriormente, evoluíram afetando o sul da região metropolitana e principalmente o ABCD paulista. Às 19:30 UTC, os núcleos mais intensos ficaram sobre as sub-regiões Norte e Leste e afetando outros municípios limítrofes como Jundiaí e Várzea Paulista ao norte da RMSP.

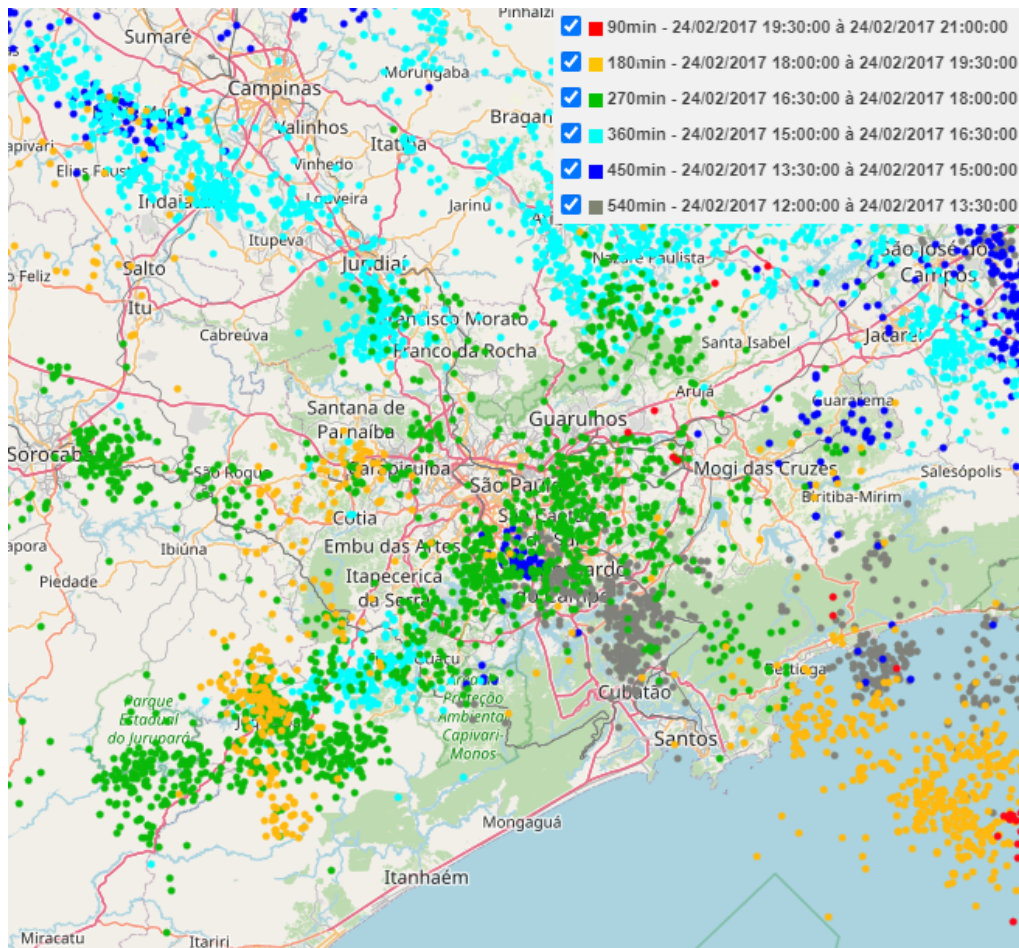
Figura 3.15 - Imagens de refletividade do radar de São Roque no Estado de São Paulo. (a) 24/02/2017 às 15:00 UTC, (b) 24/02/2017 às 19:30 UTC.



Fonte: REDEMET (2021).

Um número elevado de descargas atmosféricas foi detectado durante o período em estudo. A análise destes registros mostra áreas de maior incidência como parte do centro de São Paulo, a sub-região Sudeste, alguns municípios da sub-região Sudoeste, com destaque para Jujutiba, sul da sub-região Oeste, sub-região Leste, mais precisamente Guarulhos, e sub-região Norte, em especial Cajamar. O município Jundiaí, limítrofe da RMSP, também teve alta incidência de raios, o que está associado à passagem de núcleos convectivos intensos por aquele município, como foi mostrado nas imagens de radar (Figura 3.16)

Figura 3.16 - Descargas atmosféricas (Nuvem Solo e Intranuvem) registradas pela RIN-DAT no período entre as 12:00 HL do dia 24/02/17 e as 21:00 HL do dia 24/02/2017



Fonte: Núcleo de Monitoramento e Previsão de Descargas Atmosféricas (2021).

3.4 Sistema de modelagem acoplado CCATT-BRAMS-JULES. Ferramentas auxiliares.

O sistema de modelagem *Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System and Joint UK Land Environment Simulator* (CCATT-BRAMS-JULES) é constituído pelos modelos CCATT (LONGO et al., 2013), BRAMS (FREITAS et al., 2017) e JULES (MOREIRA et al., 2013), que em conjunto simulam os aspectos relacionados com a química da atmosfera e a meteorologia, considerando as diferentes características da superfície que determinam os fluxos de energia, massa e momento. Além do sistema, um conjunto extra de ferramentas auxiliares é necessário para o processamento dos dados de entrada e de saída do CCATT-BRAMS-JULES, assim como a configuração do mecanismo químico a ser utilizado nas simulações. A seguir é apresentada uma descrição detalhada de cada componente do sistema de modelagem BRAMS e das referidas ferramentas auxiliares.

O modelo BRAMS, versão brasileira do modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modelling System*), foi desenvolvido como resultado de um projeto em comum entre vários pesquisadores de diferentes instituições como a USP e o CPTEC/INPE. O modelo RAMS foi desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado, nos Estados Unidos de América, a partir de um modelo de mesoescala (PIELKE et al., 1992) e de um modelo de nuvens (TRIPOLI; COTTON, 1982). O RAMS foi criado para simular circulações atmosféricas variando da escala planetária até simulações de grandes turbilhões (do inglês *Large Eddy Simulations* - LES) dentro da camada limite planetária.

O modelo BRAMS por sua vez é baseado na versão 6 do RAMS (WALKO et al., 2000), e é capaz de simular escoamento em escalas de metros a centenas de quilômetros. Diversas funcionalidades específicas para a América do Sul e com foco no Brasil foram implementadas no RAMS para que este pudesse ser utilizado nos trópicos e sub-trópicos, o que resultou no BRAMS. Como exemplos das modificações inseridas vale a pena destacar a inclusão da inicialização heterogênea da umidade do solo a partir de dados provenientes de sensoriamento remoto da atmosfera em conjunto com um modelo de superfície, e também a atualização dos mapas de uso do solo para a Bacia Amazônica com dados fornecidos pelo projeto PROVEG (SESTINI et al., 2002), enquanto que o tipo de solo no Brasil foi obtido do projeto Radar na Amazônia Brasil (RADAMBRASIL). Nas demais regiões, são utilizados os mapas do uso do solo do OGE (*Olson Global Ecosystem*).

Em relação ao núcleo físico do modelo BRAMS, este inclui um grande número de opções, as quais podem ser selecionadas pelo usuário segundo as suas necessidades específicas. Uma dessas opções, que também foi implementada especificamente para o BRAMS (GRELL; FREITAS, 2014), é a parametrização da convecção rasa e da profunda do tipo ensemble. Em geral, todos os processos físicos associados à formação de nuvens (sendo quatro parametrizações de microfísica de nuvens implementadas – ver item 3.4.3), precipitação, transferência de radiação, transporte turbulento de calor na CLP, umidade e momentum, e interação com a superfície podem ser ativados.

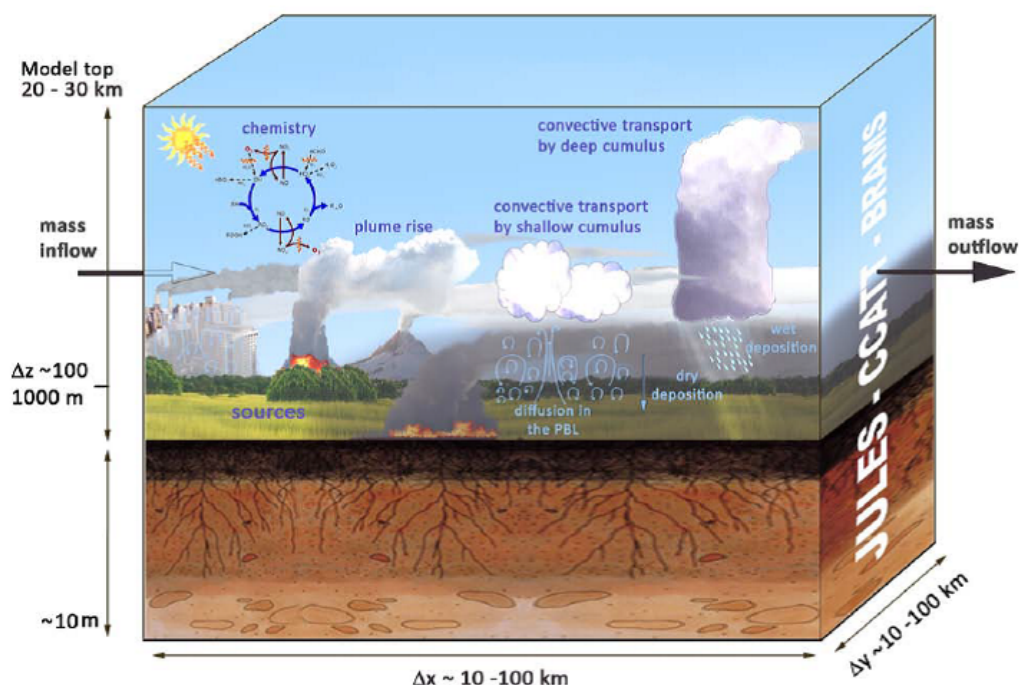
O CCATT é um modelo Euleriano de transporte atmosférico resultado dos trabalhos de Henkes (1999) e Freitas (1999). É capaz de prognosticar a razão de mistura de gases traço através da solução da equação da conservação de massa, que inclui os processos de advecção, mistura turbulenta na camada limite planetária, deposição seca e úmida, ascensão da pluma associada com focos de queimadas, e transporte vertical associado a convecção rasa (não precipitante) e a profunda. Além disso, o modelo inclui reatividade química e interação de aerossóis com a radiação solar e terrestre (ALONSO, 2011; ROSÁRIO et al., 2013).

Portanto, pode se dizer que o sistema de modelagem CCATT-BRAMS-JULES é formado por um modelo Euleriano de transporte químico atmosférico 3D, o CCATT, acoplado em linha (*on-line*) com um modelo atmosférico de área limitada, isto é o BRAMS, ambos integrados com o modelo de superfície JULES. O sistema foi projetado para estudos locais e regionais de química atmosférica da troposfera e baixa estratosfera, tanto para fins operacionais como para pesquisa (LONGO et al., 2013). Além disso, o CCATT-BRAMS-JULES foi desenvolvido utilizando ferramentas digitais avançadas, convertendo-o em um sistema de modelos flexível e multiuso, que permite ao usuário escolher as espécies químicas, tipo de emissão, qual base de dados utilizar e distintas parametrizações de superfície.

No CCATT-BRAMS-JULES, a advecção é resolvida com um esquema de 2^a ordem e limitadores de fluxo para manter a solução positiva definida. Para calcular o transporte na escala de sub-grade associado à difusão dentro da CLP utiliza-se o esquema de Mellor G. L.; Yamada (1982). O sistema pode virtualmente ser configurado com qualquer mecanismo químico, através do uso da versão modificada da ferramenta para pré-processamento químico M-SPACK (*Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics*).

O M-SPACK permite acoplamento direto com o CCATT-BRAMS-JULES para os seguintes mecanismos químicos: CB-07 (*Carbon Bond Mechanism version 07*, versão adaptada do CB-04), RACM (*Regional Atmospheric Chemistry Mechanism*), RADM2 (*Regional Acid Deposition Model, version 2*), RELACS (*Regional Lumped Atmospheric Chemical Scheme*). A Figura 3.17 apresenta alguns dos processos de sub-grade envolvidos na emissão, no transporte e na remoção de gases e aerossóis e simulados pelo CCATT-BRAMS-JULES.

Figura 3.17 - Alguns dos processos de sub-grade envolvidos na emissão, no transporte e na remoção de gases e aerossóis simulados pelo CCATT-BRAMS-JULES.

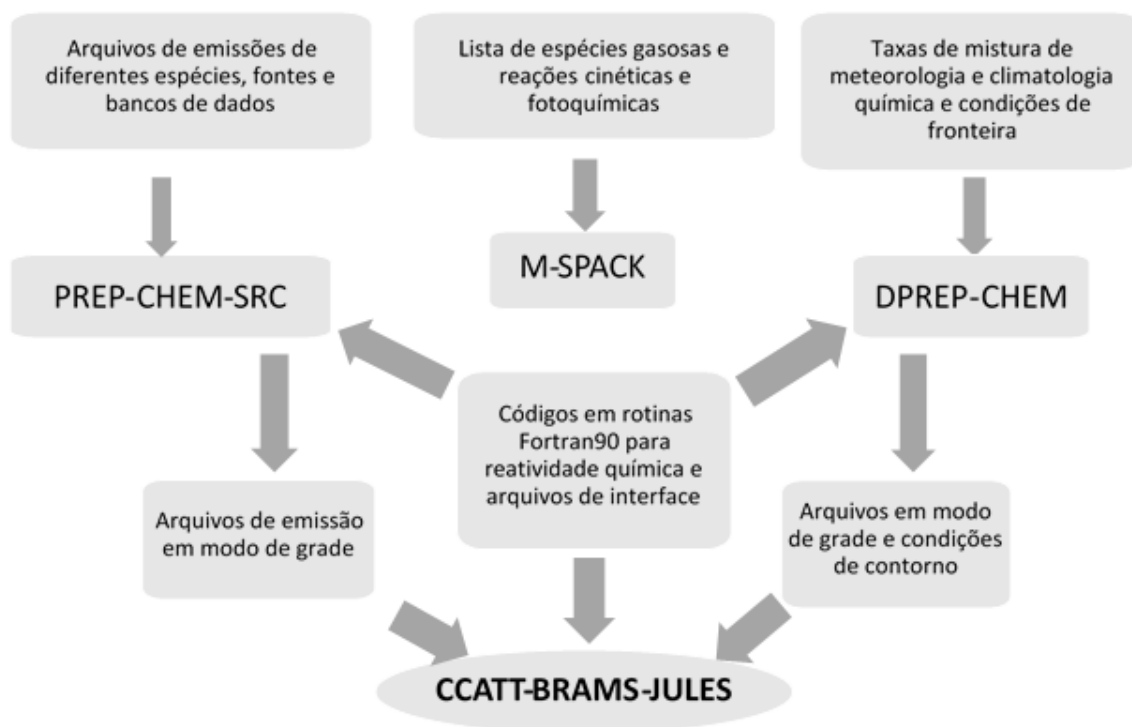


Fonte: Moreira et al. (2013).

O sistema trabalha com duas opções para o cálculo das taxas de fotólise: uma considerando condições padrão para um conjunto de ângulos zenitais e outra baseada no cálculo atualizado a cada passo no tempo com o código de transferência radiativa (interativo com nuvens e aerossóis) utilizando o modelo FAST-TUV (*Fast Tropospheric Ultraviolet-Visible*). O integrador numérico dos mecanismos químicos é baseado no método Rosenbrock.

O CCATT-BRAMS-JULES também utiliza as informações fornecidas pelo pré-processador DPREP-CHEM, ferramenta utilizada para incluir espécies químicas às condições iniciais e de contorno atmosféricas no formato necessário para o modelo. Os dados diários de emissão de poluentes, que dependem da região de estudo, são processados pela ferramenta PREP-CHEM-SRC (ver item 3.4.4) e repassados para o CCATT-BRAMS-JULES, que, por sua vez, distribui esses valores diários segundo os ciclos diurnos de cada espécie. Tanto no DPREP-CHEM como no PREP-CHEM-SRC, a informação sobre o mecanismo químico é fornecida pelo M-SPACK. As condições iniciais e de contorno atmosféricas são obtidas no formato adequado com a utilização da ferramenta “*geradp*”. Na Figura 3.18 estão representados os processos de intercâmbio de informação entre as ferramentas e o CCATT-BRAMS-JULES.

Figura 3.18 - Esquema de funcionamento das ferramentas que dão suporte ao CCATT-BRAMS-JULES.



Fonte: Adaptado de Longo et al. (2013).

Uma vez obtidos os arquivos de saída, ou análises, do CCATT-BRAMS-JULES com a realização das simulações, um pós-processador, o RAMSPOST (*RAMS-POST processing*), é utilizado para produzir arquivos correspondentes ao formato de entrada do software de visualização e produção de figuras GrADS (*GridAnalysis and Display System*) (<http://www.iges.org/grads/>). Na versão atual disponibilizada para os usuários (5.3), o pós-processador está acoplado diretamente ao sistema de modelagem.

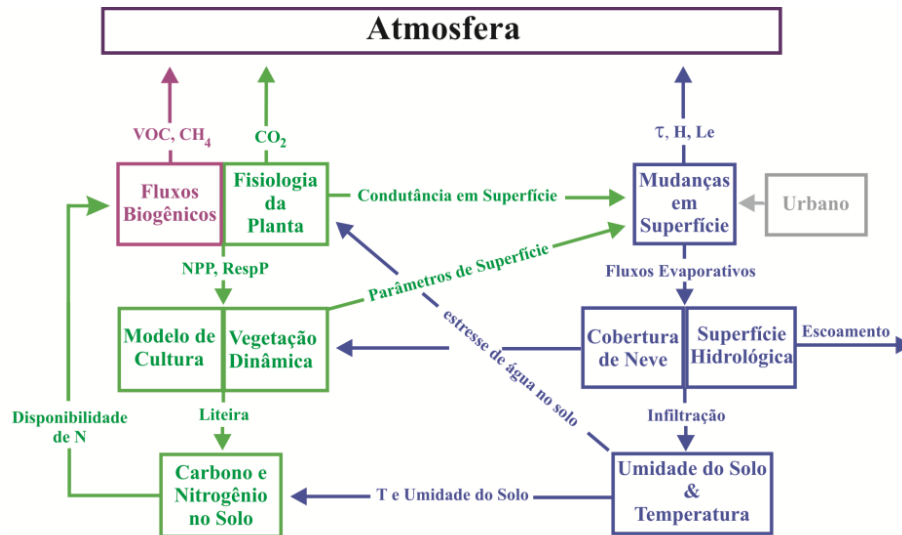
Atualmente, o CCATT-BRAMS-JULES é utilizado para pesquisas em diferentes instituições e já foi aplicado operacionalmente no CPTEC/INPE em previsões de tempo na escala espacial de 5 km por 5 km e em até 3 dias cobrindo toda a América do Sul. Também foi executado de forma operacional para a previsão da química da atmosfera na mesma instituição, porém com simulações para um domínio de resolução espacial de 20x20 km que cobria toda América do Sul. Para a realização dos diagnósticos preliminares dentro do contexto deste trabalho, utilizou-se nas simulações a versão 5.3 do BRAMS (lançada em setembro de 2017 (FREITAS et al., 2017)). Para a realização das simulações que constituem o conjunto de teste de sensibilidade (ver item 3.5.3) foi utilizada uma versão ainda em desenvolvimento, não disponível para o público em geral, a 5.4. Nesta última versão, a principal modificação está no núcleo dinâmico do sistema.

3.4.1 Modelo de Superfície JULES.

O modelo de superfície JULES (atualmente versão 3.0), parte constituinte do sistema de modelagem BRAMS, representa os processos de interação entre a superfície e a atmosfera (MOREIRA et al., 2013; FREITAS et al., 2017). O JULES é derivado do MOSES (*Met Office Surface Exchange Scheme*), modelo que simula a física dos processos superficiais, como o balanço de água e energia.

Na Figura 3.19 é apresentado um esquema ilustrativo de como os processos são modelados pelo JULES. Os itens na cor azul representam os processos relacionados à hidrologia e fluxos de energia, a cor verde refere-se aos processos que envolvem diretamente a vegetação e a violeta é referente às trocas de gases e aerossóis com a atmosfera. A camada inferior do diagrama indica os processos que ocorrem no solo, as duas camadas acima se referem aos processos localizados entre a superfície e o topo do dossel, as setas na camada superior indicam os fluxos, os gases e aerossóis que são trocados com o modelo atmosférico (MOREIRA et al., 2013).

Figura 3.19 - Diagrama ilustrativo da estrutura do modelo de superfície JULES. A cor azul representa os processos relacionados à hidrologia, a verde refere-se aos processos que envolvem diretamente a vegetação e a violeta é referente às trocas de gases e aerossóis com a atmosfera.



Fonte: Moreira et al. (2013).

O acoplamento entre o JULES e os modelos CCATT e BRAMS está baseado principalmente na troca de informações meteorológicas requeridas pelo primeiro e de fluxos de massa e energia requeridos pelo segundo. Algumas dessas informações estão relacionadas com as variáveis radiação (de onda curta e longa descendentes na superfície), precipitação, neve, componentes do vento, temperatura, umidade, e pressão atmosférica.

A física do JULES pode ser dividida em 5 módulos: balanço de energia, transferência radiativa, hidrologia, solo e vegetação.

Visando representar a heterogeneidade da superfície, o JULES trata este componente do sistema terrestre como uma *gridbox*, sendo que cada *gridbox* pode ser ocupada por cinco tipos funcionais de plantas (PFT's) e quatro tipos não funcionais de plantas (NPFT's). Os tipos funcionais são: Florestas tropicais (BT), Florestas temperadas (NT), Gramíneas C3 (C3G), Gramíneas C4 (C4G) e Cerrado (Sh); e os não funcionais são: urbano, água, solo nu e gelo.

No JULES é utilizada a estrutura de tiles, ou seja, processos de superfície, como o balanço de energia, são calculados de forma individual para cada tipo de superfície (5 vegetadas e 4 superfícies não-vegetadas), e o valor da *gridbox* é uma média do resultado dos nove tipos de superfície representados. Como consequência, para cada tile é produzido um fluxo de superfície e um gradiente vertical das variáveis atmosféricas prognósticas (vento, temperatura e umidade) entre a superfície e um nível atmosférico chamado "altura de mistura".

Para as simulações, cada grade é tratada como uma *gridbox* com dados das frações dos tipos de superfície presentes, de textura do solo e dados meteorológicos utilizados como entrada para o modelo. No JULES são consideradas três diferentes representações de área urbana, a saber: uma camada denominada 1T e duas camadas compreendendo dois esquemas, 2T e MORUSES. No esquema de duas superfícies, a geometria urbana é tratada como dois tipos de superfícies, um cânion e outro telhado.

Para a realização do presente estudo escolheu-se utilizar o esquema MORUSES, que melhor representa as características para a região de estudo (área urbana), segundo os trabalhos de [Silva \(2016\)](#) e [Henkes \(2017\)](#).

3.4.2 Núcleo dinâmico do modelo BRAMS.

Como foi visto no Item 2.3.1.2, os modelos numéricos de previsão do tempo têm vários componentes, sendo que um dos mais importantes é o componente da dinâmica. Modelos com núcleos dinâmicos acurados permitem a diminuição dos erros envolvidos nos cálculos e ao mesmo tempo favorecem a execução de simulações com resoluções espaciais maiores.

O BRAMS é um modelo não-hidrostático e compressível com a aproximação quase-Boussinesq implementada, o que permite o tratamento das ondas sonoras mantendo uma eficiência computacional razoável. Na última década, vários projetos foram desenvolvidos para melhorar o desempenho, eficiência e portabilidade do código computacional do modelo ([FAZENDA et al., 2011](#); [FAZENDA et al., 2012](#); [FREITAS et al., 2017](#)). Atualmente, a escalabilidade em paralelização chega à ordem de mais de 10^4 cores em máquinas escalares, o que permite o seu funcionamento operacional com domínios de 5 km de resolução espacial cobrindo toda a América do Sul.

Em relação ao núcleo dinâmico do modelo BRAMS na versão disponível atualmente para os usuários (5.3), este possui uma discretização espacial de 2^a ordem, e a integração temporal aplica o esquema de leapfrog, com filtro de Asselin para campos de momento e pressão, e o esquema avançado (Euler) para escalares e o formalismo “*split-explicit*” para ondas acústicas. A aplicação do filtro de Asselin no esquema de leapfrog para estabilidade faz com que o esquema temporal se torne de 1^a ordem, o que requer passos de tempo de integração temporal relativamente curtos. Assim, o núcleo dinâmico apresenta acurácia efetiva de 1^a ordem e relativamente baixa eficiência computacional em modo serial. Esse problema, junto com a implementação de esquemas de advecção altamente dispersivos que geram oscilações espúrias (oscilações de Gibbs) no transporte de escalares como distribuição de massa com fortes gradientes (caso de água condensada em nuvens), formam parte das principais deficiências numéricas do atual núcleo dinâmico do BRAMS.

Para melhorar a eficiência do BRAMS, foi desenvolvido um projeto, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e envolvendo pesquisadores do INPE e do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que teve como objetivo principal a implantação de um núcleo dinâmico alternativo. Com essa nova implementação se ganhou em acurácia numérica e ao mesmo tempo maior eficiência serial, permitindo melhorar a destreza do modelo nas simulações.

Segundo os objetivos do projeto, o núcleo dinâmico do BRAMS foi aperfeiçoado em duas frentes:

1. Formulação numérica:

- novo integrador temporal dos modos de baixa frequência;
- operador de advecção na horizontal e vertical de alta ordem.

2. Aspectos computacionais:

- desenvolvimento do código computacional para permitir o uso de esquema de discretização espacial de alta ordem;
- eficiência serial.

O resultado final do projeto deu lugar a um novo núcleo dinâmico no BRAMS, com novos integradores temporais de 2^a ordem, ao menos globalmente. Foram implementados e avaliados esquemas temporais baseados nos métodos de passo simples (principalmente aqueles derivados da série de Taylor, os métodos de Runge Kutta de 3^a ordem e de 2^a ordem) e passos múltiplos (Adams-Moulton de 3^a ordem combinado com Adams-Bashforth de 2^a ordem). Ao mesmo tempo, métodos com aproximações polinomiais de 3^a e 5^a ordem foram implementados para serem utilizados na discretização espacial para advecção de momento, campo de pressão e escalares. Estes são não oscilatórios (preservam a monotonicidade), característica que faz deles adequados para transportar escalares com forte gradiente.

Em resumo, o objetivo da implementação do novo núcleo dinâmico no modelo BRAMS foi de favorecer a realização de simulações com resoluções temporais menores, o que permitirá melhorar a resolução espacial, trazendo ganhos significativos, sem perder eficiência e sem aumentar o custo computacional. Portanto, a sua avaliação, validação e utilização para a obtenção dos resultados finais foram também estabelecidos como objetivos deste trabalho.

3.4.3 Esquemas de microfísica de nuvens no CCATT-BRAMS-JULES. Esquema de Thompson de dois momentos.

As partículas de aerossóis, como elementos constituintes da atmosfera, influem de forma variada e complexa na formação de nuvens e na ocorrência de precipitação (ver Item 2.1.3.1), isso pela grande quantidade de processos de retroalimentação que existem entre ambos elementos. Quando a resolução espacial das simulações permite a representação explícita das nuvens, o início da convecção e a evolução da morfologia das nuvens individuais tornam-se dependentes de processos parametrizados de microfísica que podem levar, ou não, em consideração a complexa interação com os aerossóis através do processo de nucleação de gotas de nuvens e de gelo. No CCATT-BRAMS-JULES existem atualmente quatro parametrizações de microfísica de nuvens implementadas, todas consideram os aerossóis ainda que com enfoques diferentes (FREITAS et al., 2017).

A primeira dessas parametrizações é derivada da que está sendo usada no RAMS na sua versão 6.0. Ela é de dois momentos e tem equações de prognóstico para concentrações em número e razão de mistura de oito categorias de hidrometeoros (nuvens, chuvisco, chuva, pristine, neve, agregados, graupel e granizo). Segundo [COTTON et al. \(2003\)](#), o esquema foi implementado mediante um algoritmo eficiente e estável para a difusão de calor e vapor sem necessidade de iteração numérica. Cada espectro de tamanho de hidrometeoros é descrito por uma distribuição gamma generalizada utilizando um parâmetro que é especificado pelo usuário. Para o cálculo relacionado com as nuvens e chuviscos são utilizados dados de concentração de núcleos de condensação (NC) e de NC gigantes (NCG), respectivamente. Uma deficiência desta parametrização está no fato dos dados de concentração de NC e NCG serem predefinidos e não calculados para cada situação ou região de estudo. No caso dos NC o procedimento é mais realista, vários valores constantes estão contidos numa tabela e a ativação de uma concentração específica é feita em função do tamanho, concentração e composição (mediante parâmetros de higroscopicidade) dos aerossóis, e também das variáveis pressão, temperatura e velocidade vertical. Já para os NCG, o valor utilizado para os processos de nucleação de chuvisco não depende das condições ambientais, o valor predeterminado é constante.

A parametrização de microfísica de Thompson ([THOMPSON et al., 2008](#)), cada vez mais utilizada na PNT, está também disponível no BRAMS. É um esquema do tipo *bulk*, que mistura o enfoque de um e de dois momentos para tratar cinco espécies de hidrometeoros (água de nuvens, gelo de nuvens, chuva, neve e uma categoria híbrida de graupel e granizo). Depois da atualização do esquema, realizado por [Thompson e Eidhammer \(2014\)](#), o enfoque de dois momentos é utilizado para as três primeiras espécies de hidrometeoros (água de nuvens, gelo de nuvens, chuva) e o de um momento para as outras duas espécies (neve e uma categoria híbrida de graupel e granizo). Essa estratégia minimiza o custo computacional. A representação explícita da concentração de gotas de água de nuvens é possível em função da inclusão no esquema da ativação de aerossóis como núcleos de condensação de nuvens (NCN) e núcleos de gelo (NG). Para fazer isso, ao invés de se determinar antecipadamente os diferentes tipos de aerossol e a composição química das múltiplas categorias, algo extremamente complexo e de alto custo computacional, estes simplesmente foram divididos em dois conjuntos: os não higroscópicos (*ice friendly*), sendo principalmente o pó mineral, e os higroscópicos (*water friendly*), onde entram os sulfatos, sal marinho, material orgânico e carbono preto.

No CCATT-BRAMS-JULES, para ativação dos aerossóis na parametrização de Thompson utiliza-se também uma tabela com valores predeterminados, onde a fração ativada de cada categoria depende dos fatores ambientais temperatura e velocidade vertical do vento e também da concentração numérica de aerossóis, raio médio das partículas e os respectivos parâmetros de higroscopicidade. No caso da temperatura e velocidade vertical os dados que são passados para o módulo de microfísica são os processados diretamente pelo CCATT-BRAMS-JULES no processo de integração, isso faz com que em cada passo temporal esses dados sejam atualizados. Para a concentração de aerossóis o próprio módulo faz a leitura de arquivos que contêm dados climatológicos dessa variável proveniente do GOCART (*Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model*) (CHIN et al., 2000). Já no caso do raio médio da partícula e da higroscopicidade, valores fixos são assumidos em cada simulação.

A cada uma dessas variáveis mencionadas anteriormente relacionadas com a microfísica é associada uma constante que toma um valor específico dependendo de intervalos numéricos pré-definidos para cada variável. Isto é, segundo valor de cada variável que entra no módulo de microfísica em cada passo temporal, um intervalo é associado e ao mesmo tempo esses intervalos estão caracterizados por valores constantes. Os intervalos definidos para cada variável, quando se pretende calcular o fator de ativação, são:

Concentração = (/10.0, 31.6, 100.0, 316.0, 1000.0, 3160.0, 10000.0/)

Velocidade vertical = (/0.01, 0.0316, 0.1, 0.316, 1.0, 3.16, 10.0, 31.6, 100.0/)

Temperatura = (/243.15, 253.15, 263.15, 273.15, 283.15, 293.15, 303.15/)

Raio médio da partícula = (/0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.16/)

Higroscopicidade = (/0.2, 0.4, 0.6, 0.8/)

Esses valores das constantes mencionadas anteriormente vão definir em conjunto posições dentro de uma matriz penta-dimensional de dados que finalmente serão empregados no cálculo da fração de ativação dos aerossóis e para o processo de formação de gotículas de água das nuvens. A matriz de dados foi construída seguindo a teoria de ativação de Köhler dentro de um modelo de parcela de Feingold e Heymsfield (1992), com mudanças adicionais por Eidhammer et al. (2009) para usar o parâmetro de higroscopicidade.

De forma geral, o esquema de microfísica de Thompson, quando comparado com o já implementado no RAMS, tem um custo computacional mais baixo, o que é de grande importância quando se trabalha com simulações em altíssima resolução e com equipamento computacional limitado. Mesmo com as restrições atuais, o esquema tem mostrado resultados satisfatórios (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014), pelo que, como parte dos objetivos desta pesquisa, foi feito um estudo para determinar a melhor combinação dos parâmetros constantes relacionados com raio médio das partículas de aerossóis e higroscopicidade. Para tanto, foram considerados os valores prováveis que estas variáveis poderiam apresentar para uma região da natureza da RMSP (mais detalhes no Item 3.5.2). Ao mesmo tempo algumas modificações no código do módulo de microfísica foram necessárias durante o desenvolvimento do trabalho para melhorar o desempenho do mesmo.

3.4.4 Pré-processador de emissões PREP-CHEM-SRC.

Como foi apresentado no Item 3.4, no CCATT-BRAMS-JULES a ferramenta responsável pela geração das emissões é o PREP-CHEM-SRC, que cria os dados de entrada para diferentes campos de emissão de gases e partículas, considerando as fontes antropogênicas (móveis e fixas), biogênicas, assim como a queima de biomassa e atividade vulcânica. Além desses campos serem utilizados pelo CCATT-BRAMS-JULES, são também compatíveis com o modelo WRF/CHEM.

Os campos são gerados a partir de distintas fontes de dados (globais, regionais e locais) e com a mesma resolução utilizada nas execuções do CCATT-BRAMS-JULES. Nesse processo são utilizadas técnicas de aproximação, dependentes do tipo de emissão e da resolução final dos dados, em busca de uma representação mais próxima possível da realidade. No caso de pesquisas vinculadas com grandes centros urbanos, as emissões mais relevantes são as antropogênicas e principalmente associadas às fontes móveis, nomeadamente a frota veicular.

Na parametrização da emissão dos gases traços e aerossóis pela queima de biomassa (CO, CO₂, CH₄, NO_x e PM_{2,5}), o PREP-CHEM-SRC usa os produtos de fogo de fogo do GOES - WF ABBA (*Geostationary Operational Environmental Satellite with Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm*) (<http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/burn/abba.html>), do GOES AVHRR (*Geostationary Operational Environmental Satellite - Advanced Very High Resolution Radiometer*), do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e o produto gerado pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do CPTEC/INPE (<http://www.cptec.inpe.br/queimadas/>).

Os fatores de combustão e emissão adotados são os derivados de medidas diretas (FREITAS et al., 2017). Para cada fogo captado por sensoriamento remoto, estima-se a massa emitida de gás traço ou aerossol através da caracterização da biomassa disponível para a queima, os respectivos fatores de combustão e emissão e a área de queima. O tipo de vegetação que está queimando é obtido do mapa de vegetação de 1km do IGBP-INPE (*International Geosphere-Biosphere Programme INPE*: <http://www.cptec.inpe.br/proveg/>). O modelo encarregado de fazer todo esse procedimento é denominado *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) (LONGO et al., 2013).

Emissões biogênicas são obtidas a partir do inventário do programa GEIA/ACCENT (*Global Emissions Inventory Activity / Atmospheric Composition Change the European Network*) (<http://www.aero.jussieu.fr/projet/ACCENT/description.php>), na resolução espacial de 1°x1°, ou também a partir do modelo MEGAN (*Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature*), utilizado para estimativa da emissão líquida de gases e aerossóis por ecossistemas terrestres. O MEGAN requer prévio conhecimento de variáveis que incluem cobertura do solo e condições meteorológicas e químicas.

Atualmente, a versão do PREP-CHEM-SRC disponível aos usuários, para contabilizar as emissões antropogênicas, utiliza bases de dados globais com resoluções típicas maiores que 10 km em todos os casos RETRO (*Reanalysis of the Tropospheric chemical composition*), EDGAR (*Emission Database for Global Atmospheric Research*) e GOCART. Também é possível efetuar distribuição de emissões locais, em cidades específicas, utilizando um esquema de interpolação denominado “delimitado por área” onde o valor de emissão local da cidade para determinado poluente é distribuído de forma homogênea na área que ocupa o município em questão (ALONSO, 2011).

Pelo fato de cada mecanismo químico levar em consideração espécies que diferem, em alguns casos é preciso que os arquivos de saída do PREP-CHEM-SRC sejam específicos para cada um dos mecanismos. Para isso, o pré-processador possui várias sub-rotinas que se encarregam da compatibilização entre mecanismos e os inventários, especificamente de indicar, para cada espécie do inventário, a espécie do mecanismo à qual pertence e o coeficiente de agregação com o qual as emissões do inventário entram no valor de emissão da espécie do mecanismo químico (GACITA, 2011).

A resolução espacial das grades de emissões é flexível, podendo ser de alcance regional ou global, e existem diversas projeções geográficas disponíveis. Tal flexibilidade permite também a utilização de uma grade previamente configurada e que corresponda com a utilizada por um modelo de previsão de tempo químico, procedimento específico utilizado neste trabalho. Um arquivo nomeado *prep-chem-src.inp* permite ao usuário escolher as opções de configuração. Como exemplo, destaca-se as bases de dados globais de emissão a serem utilizadas, o mecanismo químico para o qual serão preparadas as emissões e também os caminhos onde os dados de saída deverão ser guardados para sua posterior utilização.

Neste trabalho, para a obtenção de todos os inventários de emissão para a região de estudo (Capítulo 6), foram utilizadas as bases de dados globais de emissão antropogênicas RETRO e EDGAR-HTAP (OLIVIER; BERDOWSKI, 2001), porém atualizadas com dados de emissão local, assim como o MEGAN para as emissões biogênicas; não se fez uso de emissões vulcânicas.

3.5 Características, configurações e objetivos das simulações realizadas com o CCATT-BRAMS-JULES.

Para dar cumprimento aos objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizadas várias simulações com o CCATT-BTRAMS-JULES. Cada uma com características e propósitos diferentes, mas no final todas contribuíram para o principal objetivo que foi estudar os impactos do material particulado e da superfície no desenvolvimento de tempestades severas em regiões urbanas. Neste tópico serão descritas as configurações gerais das simulações e as características específicas de cada uma delas, dividindo-as em: a) aquelas relacionadas com avaliação, validação, calibração e obtenção da simulação considerada CONTROLE; b) as relacionadas com os testes de sensibilidade onde fatores relacionados com aerossóis e superfície foram mudados.

3.5.1 Configurações gerais das simulações.

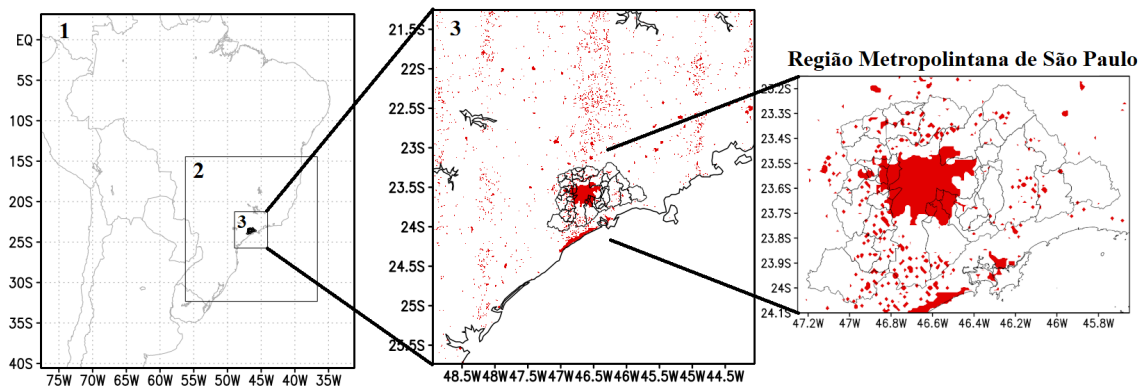
Para melhor compreensão, as simulações serão tratadas de aqui em diante como conjuntos de simulações (CSs), sendo que cada conjunto inclui 3 simulações com grades e resoluções diferentes:

- 1^a simulação: utilizou-se um domínio de resolução espacial horizontal mais grossa de 10 km,
- 2^a simulação: utilizou-se um domínio de resolução espacial horizontal de 5km e
- 3^a simulação: utilizou-se um domínio de resolução espacial horizontal de 1 km.

As versões utilizadas do sistema de modelagem CCATT-BRAMS-SRC foram a 5.3, na primeira fase da pesquisa, e posteriormente a 5.4 com o novo núcleo dinâmico, como foi detalhado anteriormente. No total foram 28 conjuntos de simulações e 15 simulações independentes relacionadas para a análise de sensibilidade que reutilizaram os resultados para o domínio de 10 e de 5 km.

Na Figura 3.20 podem ser observadas as extensões dos domínios que foram considerados no estudo. A grade 1, a maior com resolução de 10 km, inclui quase toda a América do Sul. A grade 2, de resolução 5 km, está centrada na RMSP e abarca as regiões Sul, Sudeste, parte do Centro-Oeste do Brasil e também parte de Uruguai, Paraguai, Argentina e uma porção do Oceano Atlântico. Já a grade menor, com maior resolução espacial (1 km), que também tem seu centro localizado na RMSP, abarca principalmente áreas mais a leste do Estado de São Paulo e a região do Oceano Atlântico próxima à costa. Foi utilizado um processo de *downscaling* numa direção e semiautomático, onde as simulações sobre a grades de resolução 5 km e 1 km utilizam os resultados das simulações com grades de 10 km e 5 km respectivamente para as condições iniciais e de contorno.

Figura 3.20 - Localização sobre superfície dos domínios de estudo utilizados pelo CCATT-BRAMS-JULES. Grades 1, 2 e 3 com resoluções espaciais de 10 km, 5 km e 1 km respectivamente. Ampliação do domínio de 1km na imagem do centro. Subdomínio utilizado para a análise das mudanças da precipitação abrangendo a RMSP na imagem da direita. Em vermelho está destacada a área de mancha urbana que o modelo utiliza a partir dos dados de superfície mencionados no Item 3.4.



Fonte: Produção do autor.

Os campos meteorológicos utilizados como condições iniciais e de contorno na grade de resolução 10 km, em todos os CSs, foram obtidos das análises do modelo global GFS e dos dados de reanálise (ERA5) do modelo do centro europeu *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), ambos conjuntos de dados com resolução de 0,25°. Nos CSs onde se utilizou o CCATT para os cálculos relacionados com a química da atmosfera, as condições iniciais e de contorno para o domínio de 10 km foram baseadas na climatologia mensal das análises do modelo global MOCAGE (*MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle*) para o continente sul-americano.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as características específicas das configurações para os três domínios que utilizam as grades descritas anteriormente.

Tabela 3.3 - Características gerais, em comum, dos domínios utilizados nos diferentes conjuntos de simulações.

Característica	Domínio 1 (grade grossa)	Domínio 2 (grade intermédia)	Domínio 3 (grade fina)
Centro	19°00'00.0''S 54°24'00.0''O	23°30'00.0''S 46°30'00.0''O	23°30'00.0''S 46°30'00.0''O
Resolução Horizontal (km)	10 km x 10 km	5 km x 5 km	1 km x 1 km
Nº de pontos de grade na horizontal	500 x 500	400 x 400	500 x 500
Extensão horizontal (km)	5000 x 5000	2500 x 2500	500 x 500
Níveis verticais	47 níveis 100 m de espessura da primeira camada com uma razão de aumento de 1,07 vezes (progressão geométrica) e um máximo de separação de 700 m		
Passo de tempo meteorológico (s)	30	10	1
Passo de tempo químico (s) (quando utilizado o CCATT)	120	40	4

Outras configurações relevantes em comum para todos os CSs estão relacionadas com a componente física do modelo, as parametrizações. Para todas as simulações, o esquema de radiação utilizado foi o RRTMG (*Rapid Radiation Transfer Model*, versão para GCMs). Este esquema soluciona a transferência radiativa utilizando o método de dois fluxos e inclui todos os principais elementos absorvedores e espalhadores moleculares (vapor de água, monóxido de carbono, ozônio, oxigênio), assim como a extinção da radiação solar pelos aerossóis.

A implementação RRTMG no CCATT-BRAMS-JULES preservou todos os coeficientes de absorção para espécies moleculares utilizadas no método de distribuição k correlacionado, que se basearam em um modelo *line-by-line* (FREITAS et al., 2017).

O esquema de microfísica de nuvens utilizado foi o de Thompson, tanto o de 1 como o de 2 momentos. Neste sentido, especificou-se que o domínio com 10 km sempre estaria configurado para utilizar a microfísica de Thompson de um momento, que não utiliza dados de aerossóis para o cálculo da distribuição dos hidrometeoros nas nuvens.

No caso da parametrização convectiva de cúmulos profundos e rasos utilizou-se implementada por Grell e Freitas (2014) para os domínios com resolução espacial de 10 km e 5 km. No domínio de 1 km as nuvens foram resolvidas de forma explícita.

Para representar a área urbana, baseado nos resultados de Silva (2016) e Henkes (2017), o esquema MORUSES, presente no JULES, foi o selecionado.

Para o tratamento dos diferentes processos relacionados com os aerossóis nesta pesquisa, especificamente os vinculados ao transporte, à remoção e emissão, quando utilizado o CCATT, se selecionou o modelo já implementado no sistema de modelagem e denominado SIMPLES. Ele é utilizado para cinzas vulcânicas, queima de biomassa, sal marinho e aerossóis urbanos (LONGO et al., 2013). O mecanismo químico utilizado nas simulações com CCATT ativado foi o RELACS-TUV.

Todas as simulações que compõem os CSs foram configuradas para gerar arquivos de saídas com intervalos de 1 hora. O tempo total de integração em cada simulação variou entre 48 e 84 horas durante os dias em que aconteceram os eventos, nos meses de fevereiro e junho, que constituem os casos de estudo. Nos próximo tópico serão especificados mais detalhes. Todas as execuções do CCATT-BRAMS-SRC foram realizadas no supercomputador TUPÃ, alojado no CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista/São Paulo.

3.5.2 Simulações para o diagnóstico, calibração e validação do sistema de modelagem. Obtenção do CONTROLE.

Em pesquisas onde se utilizam modelos numéricos de previsão do tempo é necessário verificar a eficiência dos modelos em representar as características e processos ambientais que se pretende estudar. É por isso que a etapa de diagnóstico, calibração e validação é tão importante e está incluída nos objetivos específicos deste trabalho. O empregado de uma versão do CCATT-BRAMS-JULES, a 5.4, ainda em fase de avaliação para o seu lançamento, fez com que esta etapa fosse ainda mais importante. A seguir serão apresentados as características dos conjuntos de simulações realizados para completar a etapa em questão.

- Num primeiro momento foram realizados conjuntos de simulações com a versão do modelo mais estável até o momento, a 5.3, e também com a 5.4 para realizar o diagnóstico inicial na representação dos casos de estudo selecionados, e com isso efetuar também uma comparação entre os resultados obtidos com ambas versões. Para isso, foram realizados 4 CSs, com o CCATT ativado, que são especificados na Tabela 3.4. Essas primeiras simulações mostraram o correto funcionamento, considerando os processos computacionais de compilação e execução, da versão 5.4. Nos 4 CSs foram utilizados dados do GFS para a geração das condições iniciais e de contorno.

Tabela 3.4 - Características dos Conjuntos de Simulações realizados para o diagnóstico inicial do CCATT-BRAMS-JULES em representar as condições ambientais dos casos de estudo.

Conjunto de Simulação	Versão do CCATT-BRAMS-JULES	Período de integração	Microfísica de nuvens. THOMPSON E EIDHAMMER, (2014)
CS_A1	5.3	00 UTC 05/06/2017 até 00 UTC 08/06/2017	Opção 2 – de 1 momento para todos os domínios.
CS_A2	5.3	00 UTC 24/02/2017 até 00 UTC 26/02/2017	Opção 2 – de 1 momento para todos os domínios.
CS_B1	5.4	00 UTC 05/06/2017 até 00 UTC 08/06/2017	Opção 2 – de 1 momento para todos os domínios.
CS_B2	5.4	00 UTC 24/02/2017 até 00 UTC 27/02/2017	Opção 2 – de 1 momento para todos os domínios.

Uma vez avaliado o funcionamento da versão 5.4 como satisfatório, se precedeu a utilizar exclusivamente essa versão em todos os CSs realizados posteriormente, que são descritos neste Item e no próximo. Da mesma forma, os dados do ERA5 foram os utilizados sempre como fontes para a geração das condições iniciais e de contorno, exceto quando se especifique o contrário.

- O próximo passo foi a calibração do modelo, especificamente do módulo de microfísica, com o objetivo de melhorar os resultados e conseguir utilizar a microfísica de representação explícita de nuvens de 2 momentos (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014). Para isso, o primeiro passo foi selecionar os parâmetros relacionados com o raio médio das partículas de aerossóis (parâmetro l) e com a higroscopicidade (parâmetro m), que são utilizados para o cálculo da fração de ativação (ver Item 3.4.3). Neste sentido, foram realizados 8 CSs divididos em dois grupos de 4, nestes CSs o CCATT foi desativado permanecendo assim até a etapa de aprimoramento de emissões que será detalhada mais adiante. Considerando o caso de estudo 1, o primeiro grupo teve como objetivo utilizar diferentes horários para inicializar as simulações e determinar em qual deles a representação foi mais satisfatória em relação aos dados observados. Nos primeiros 4 CSs utilizou-se a microfísica de 1 momento, na qual as características dos aerossóis não são consideradas. Uma vez identificado o melhor horário, que coincidiu com o início do período de chuva intensa (12:00 UTC do dia 05/06/2017), foram realizados os outros 4 CSs, sendo que em cada um se estudou uma combinação diferente de parâmetros l e m . Esse último procedimento foi necessário, pois entre os estudos consultados (ALBUQUERQUE et al., 2012; ALMEIDA et al., 2012; BACKMAN et al., 2011; YNOUE; ANDRADE, 2004; WANG et al., 2018; MONTEIRO et al., 2021), e que tratam sobre esses parâmetros de raio médio e higroscopicidade para a RMSP e outras regiões similares, foram encontrados valores diferentes, que quando agrupados e comparados com os intervalos mostrados anteriormente (Item 3.4.3) levou a identificação de dois intervalos possíveis para cada parâmetro. Para o raio médio da partícula $l = 2$ (intervalo 0,01- 0,02 micrômetro) e $l = 3$ (intervalo 0,02 - 0,04 micrômetros), para higroscopicidade $m = 1$ (intervalo < 0,2) e $m = 2$ (intervalo 0,2 - 0,4). As combinações utilizadas em cada CSs foram $lm = 21, 22, 31$ e 32 como se mostra na Tabela 3.5.

Uma característica importante das simulações com o domínio de 10 km, e que já foi colocada no Item anterior, é que elas foram realizadas com microfísica de 1 momento. Isso facilitou a reutilização dos resultados obtidos no conjunto de simulações **CS_C4**, especificamente no domínio de 10 km, como condições iniciais e de contorno das simulações com resolução especial de 5 km da série D (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Características dos conjuntos de simulações realizados para determinar os parâmetros a utilizar relacionados com raio médio e a higroscopicidade das partículas de aerossóis. A série C dos CSs teve o objetivo de determinar o melhor horário para a inicialização enquanto a série D permitiu a escolha da melhor combinação dos parâmetros l e m da microfísica de nuvens.

Conjunto de Simulação	Período de integração	Microfísica de nuvens. THOMPSON E EIDHAMMER, (2014)
CS_C1	00 UTC 04/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	Opção 2 – de 1 momento para todos os domínios.
CS_C2	12 UTC 04/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	
CS_C3	00 UTC 05/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	
CS_C4	12 UTC 05/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	
CS_D1	12 UTC 05/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017.	Opção 2 – de 1 momento - domínio de 10 km.
CS_D2		Opção 3 – de 2 momento - domínios de 5 km e 1 km com $l=2$, $m=1$.
CS_D3		Opção 2 – de 1 momento - domínio de 10 km.
CS_D4		Opção 3 – de 2 momento - domínios de 5 km e 1 km com $l=2$, $m=2$.
		Opção 2 – de 1 momento - domínio de 10 km.
		Opção 3 – de 2 momento - domínios de 5 km e 1 km com $l=3$, $m=1$.
		Opção 2 – de 1 momento - domínio de 10 km.
		Opção 3 – de 2 momento - domínios de 5 km e 1 km com $l=3$, $m=2$.

O próximo passo foi calibrar os valores de concentração de aerossóis, tanto em relação ao NCN como os NG que são lidos pelo módulo de microfísica de nuvens para a realização dos cálculos. Esses dados são originalmente provenientes do GOCART, como foi especificado no item 3.4.3, e os dados disponíveis no sistema de modelagem são para 2007. Se precedeu então à realização de um estudo sobre a concentração de aerossóis (especificamente MP10T) monitorada nas estações da CETESB (<https://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/exportaDados>) localizadas dentro da RMSP. Os resultados mostraram valores observados entre $5,41E+9$ e $1,62E+11$ (/kg) em ambos períodos de estudo, todos superiores aos utilizados pelo CCATT-BRAMS-SRC na sua configuração inicial. Se considerou para o cálculo das concentrações numéricas um raio médio da partícula de 0,03 micrômetros e o diâmetro equivalente de Stokes para determinar a densidade dos aerossóis. Tendo em vista esta situação, se procedeu a incluir um fator de controle da variação de concentração dentro do código, denominado FXX , que permitiu modificar esta variável para determinar os valores de concentrações que melhorassem o desempenho do modelo na representação da precipitação. Considerou-se o caso de estudo 01 para a calibração.

Nesta etapa, 5 CSs foram realizadas, utilizando 4 valores diferentes de FXX (1,5, 2,5, 2,9, 3 e 3,1), como mostrado na Tabela 3.6, e o CCATT também ficou desativado durante essas simulações. O domínio de 10 km foi o mesmo do **CS_C4** em todas as simulações da série E.

Tabela 3.6 - Características dos Conjuntos de Simulações realizadas para calibrar os valores de concentração de aerossóis utilizados no módulo de microfísica de nuvens. FXX , fator de variação dos aerossóis dentro do código da microfísica no modelo.

Conjunto de Simulação	Período de integração	Microfísica de nuvens. THOMPSON E EIDHAMMER, (2014)	Valor de FXX
CS_E1	12:00 UTC 05/06/2017 até 12:00 UTC 07/06/2017.	Opção 2 – de 1 momento - domínio de 10 km. Opção 3 – de 2 momento - domínios de 5 km e 1 km com $l=3, m=2$.	1,5
CS_E2			2,5
CS_E3			2,9
CS_E4			3
CS_E5			3,1

As análises dos resultados dos CSs das séries E mostraram que com $FXX=3$ foi possível obter a melhor representação dos eventos extremos em estudos. Com isso, ficaram estabelecidas as características dos CSs **CONTROLE**. Em relação à microfísica de Thompson e Eidhammer (2014) ficaram definidas para esses CSs: $l = 3, m = 2, FXX = 3$. Chamaremos então ao CS **CS_E4** como **CONTROLE_1** e para o caso de estudo 02 foram feitas novas simulações, com as características descritas anteriormente no período de tempo específico do caso, que constituíram o conjunto de simulações (CS) denominado, doravante, **CONTROLE_2**.

- Uma vez estabelecidos os parâmetros a serem utilizados no módulo de microfísica, foi realizado um estudo sobre as diferentes respostas do modelo na representação dos constituídos 6 novos CSs, todas com as mesmas características especificadas anteriormente para os CSs **CONTROLE**, mas com período maiores de integração e momentos diferentes de inicialização. Na Tabela 3.7 são detalhados os períodos de integração de cada CSs feito nesta etapa.

Tabela 3.7 - Características dos conjuntos de simulações realizados para avaliar a resposta do CCATT-BRAMS-JULES na representação dos casos de estudo ao se fazer a inicialização do sistema em diferentes horários.

Conjunto de Simulação	Período de integração	Microfísica de nuvens. THOMPSON E EIDHAMMER, (2014)
CS1_0400	00 UTC 04/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	Opção 2 – de 1 momento - domínio de 10 km. Opção 3 – de 2 momento - domínios de 5 km e 1 km com $l=3, m=2$.
CS1_0412	12 UTC 04/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	
CS1_0500	00 UTC 05/06/2017 até 12 UTC 07/06/2017	
CS2_2300	00 UTC 23/02/2017 até 12 UTC 26/02/2017	
CS2_2312	12 UTC 23/02/2017 até 12 UTC 26/02/2017	
CS2_2400	00 UTC 24/02/2017 até 12 UTC 26/02/2017	

Como última atividade, dentro da etapa de diagnóstico, calibração e validação do sistema de modelagem, foram constituídos 2 novos CSs com as mesmas características e período de integração definidos para os conjuntos CONTROLE, mas com uma única diferença, nesses novos CSs as condições iniciais e de contorno do domínio de 10 km foram geradas a partir dos dados provenientes do modelo global GFS. Nos próximos itens, para referir-se a esses CSs em particular se utiliza a nomenclatura **CS1_GFS** (caso de estudo 01, dias 5 e 6 de junho) e **CS2_GFS** (caso de estudo 02, dias 24 e 25 de fevereiro). Lembrando que em todos os casos o processo de aninhamento de grade foi utilizado. A mancha urbana no contexto da RMSP e arredores foi definida de acordo com os dados de usos de solo que o CCATT-BRAMS-JULES utiliza (Figura 3.20).

- O último objetivo específico do presente trabalho focou na necessidade de aprimorar as emissões de poluentes e principalmente de aerossóis nas regiões urbanas, para que seja possível, em futuras pesquisas, implementar o processo de retroalimentação entre a microfísica e o prognóstico do aerossóis, que são tratados de forma implícita pelo sistema de modelagem com a ativação do módulo CCATT. O aprimoramento das emissões para áreas urbanas foi feito, e como parte do processo foram constituídos dois CSs com o CCATT ativado e características de emissão diferentes. Os conjuntos foram denominados de **CS1_SV** e **CS1_CV**, fazendo referência à inclusão das vias de mobilidade no processo de determinação de emissão na região de estudo. No primeiro conjunto (**CS1_SV**), foram utilizados as bases de dados globais EDGAR-HTAP e RETRO para a geração dos arquivos de emissão pela ferramenta PREP-CHEM-SRC, e também o processo de distribuição homogênea de emissões por município, de acordo com (ALONSO, 2011) No segundo conjunto (**CS1_CV**), como resultado da presente pesquisa, foi incluída a opção de distribuição de emissões veiculares em acordo com a malha viária da RMSP.

As configurações desses CSs foram as mesmas do CONTROLE para o caso de estudo 01, variando unicamente o período de integração. Em ambos os casos, **CS1_SV** e **CS1_CV**, o período foi entre as 00:00 UTC do dia 08/06/2017 até as 00:00 UTC do dia 10/06/2017. As configurações gerais descritas no Item 3.5.1 também foram mantidas.

3.5.3 Simulações para o estudo da sensibilidade às mudanças nas propriedades dos aerossóis e da superfície urbana.

As características da superfície influem de forma fundamental na formação e na intensidade do fenômeno de ilha de calor, e ao mesmo tempo podem modificar a circulação do vento local induzindo áreas de convergência onde os poluentes, principalmente aerossóis, podem se acumular. Esse efeito pode ter impacto importante na distribuição dos aerossóis dentro da área urbana e regiões vizinhas com consequente influência na sua atuação como núcleos de condensação, através do qual podem favorecer ou inibir a formação de nuvens e precipitação. Ao mesmo tempo, as regiões urbanas constituem fontes de alta emissão de aerossóis. Variações em qualquer um desses elementos, isto é, superfície ou conteúdo de aerossóis, podem causar modificações nos processos atmosféricos e, conseqüentemente, no tempo.

Um exemplo é a pesquisa realizada por Dias et al. (2013), onde se sugere que o incremento de eventos extremos de chuva diária, observado entre 1933 e 2010, não é apenas consequência de variações nos índices climáticos e na temperatura do mar da costa da região sudeste do Brasil, mas que também estaria relacionado com a ilha de calor urbana da RMSP e o aumento de poluentes, isso principalmente na estação de chuva.

Para o estudo do impacto que os aerossóis e a superfície urbana têm sobre os eventos de precipitação extrema, foram realizadas várias simulações considerando variações nestes dois aspectos. Todas as simulações foram utilizando o domínio de 1 km, as condições iniciais e de contorno foram mantidas iguais às dos CSs CONTROLE para o domínio de 5 km. Os períodos de integração foram também os mesmos utilizados nos CSs CONTROLE. As simulações S1_# estão relacionadas com o caso de estudo 01, e foram realizadas para o período de tempo compreendido entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 12:00 UTC do dia 07/06/2017. As simulações S2_# estão associadas ao caso de estudo 02, e foram realizadas para o período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 24/02/2017 e as 12:00 UTC do dia 26/02/2017.

Os dois tipos de aerossóis incluídos pela microfísica de nuvens de Thompson e Eidhammer (2014), ver Item 3.4.3, foram tratados de forma independente. Para isso, foram considerados dois fatores de variação, denominados como fator $FXXw$ para os aerossóis *water friendly* e $FXXi$ para os *ice friendly*, que permitiram aumentar ou diminuir as concentrações utilizadas pelo sistema de modelagem na integração.

Para determinar o grau de variação das concentrações, tanto de aumento como de diminuição, foram consideradas duas situações reais. O procedimento será descrito a seguir:

- A partir dos dados de mobilidade coletados durante o isolamento social no ano de 2020 devido à pandemia de SARS-CoV-2 que afeta o mundo todo provocando milhões de mortos, disponibilizados pelo governo do Estado de São Paulo (<https://www.saopaulo.sp.gov.br/coronavirus/isolamento/>), foram determinados 3 dias úteis seguidos com maior porcentagem de isolamento em todo o ano para o município de São Paulo. Assumiu-se que nesses dias a circulação de veículos, e por tanto a emissão de material particulado, diminuiu consideravelmente. Os dias que atenderam ao critério estabelecido foram 30 e 31 de março e 01 de abril, e a porcentagem de isolamento variou entre 56 % e 57 %.

- Também foi realizado um estudo do comportamento histórico dos dados de concentrações de MP10T registradas por 8 estações da CETESB localizadas na RMSP para os dias determinados anteriormente considerando o período entre 2005 e 2020. O objetivo foi determinar quanto representou a diminuição das concentrações observadas em 2020 em relação dos anos anteriores. Na Tabela 3.8 são exibidos os resultados obtidos, em alguns anos os dados das estações não estavam disponíveis. Se obteve um valor médio de diminuição de 28 %, valor este considerado para os testes de sensibilidade quando as simulações consideraram diminuição de aerossóis.

Tabela 3.8 - Dados de diferenças nas concentrações de MP10T em 8 estações da CETESB comparando os valores médios do período entre 2005 – 2019 e o ano de 2020 para os dias em que ocorreu a maior taxa de isolamento durante a pandemia de SARS-CoV-2 em 2020 (30 e 31 de Março, 1 Abril). Concentrações em $\mu g/m^3$.

Estação	Concentração média de MP10T entre 2005 e 2019	Concentração média de MP10T no ano de 2020	Diferença	Porcentagem de diminuição
Congonhas	35,89	23,49	-12,4	- 34,6
Itaim Paulista	25,11	17,82	-7,29	-29
Marginal Tiete	25,69	22,92	-2,77	-11
Cerqueira César	25,1	17,86	7,24	-28,8
Grajau Parelheiros	26,94	19,92	7,02	-26
Parque Dom Pedro II	26,22	18,42	-7,8	-29,7
São Caetano	28,12	20,37	-7,75	-27,6
Santo Amaro	26,9	17,95	-8,95	-33,3

- Para determinar o fator de aumento dos aerossóis nas simulações se considerou um caso extremo de concentração de aerossóis acontecido em Seul, na Coreia do Sul, entre os dias 11 e 15 de janeiro de 2019 (OH et al., 2020). Quando comparados os dados observados em Seul e os valores médios de concentração registrados nas estações analisadas anteriormente para o período 2005 – 2020, se observou que os dados da capital Coreana foram 4 vezes superiores aos da RMSP.

O valor de diminuição de aproximadamente 28 % na concentração dos aerossóis determinado anteriormente é considerado ao adotar um fator de variação (seja FXX , $FXXw$ ou $FXXi$) igual a 2,1 no código da microfísica. O grau de aumento das concentrações em 4 vezes se considera ao utilizar um fator de variação igual a 15. Para simular a sensibilidade às mudanças na superfície urbana, foi necessário modificar o código do módulo de superfície do CCATT-BRAMS-JULES, especificamente a sub-rotina *src/brams/surface/ruser.f90*, de forma tal que a mancha urbana observada na Figura 3.20 fosse substituída pela vegetação predominante na região, observada atualmente ao redor da RMSP (pastais arvoados) . As características específicas de cada CS estão detalhadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Características das simulações realizadas para estudar o impacto de mudanças na concentração dos aerossóis e da mancha urbana nos eventos de precipitação extrema nas regiões urbanas. FXX : fator de variação dos aerossóis totais, $FXXi$: fator de variação dois aerossóis *ice friendly*, $FXXw$: fator de variação dos aerossóis *water friendly*.

Conjunto de Simulação	Fator de variação da concentração dos aerossóis	Extensão da mancha urbana
S1_1 e S2_1	Aumento em ambos tipos de aerossóis - $FXX = 15$	Igual ao CONTROLE
S1_2 e S2_2	Diminuição em ambos tipos de aerossóis - $FXX = 2,1$	
S1_3 e S2_3	Manutenção $FXXw = 3$ e Aumento $FXXi = 15$	
S1_4 e S2_4	Manutenção $FXXw = 3$ e Diminuição $FXXi = 2,1$	
S1_5 e S2_5	Aumento $FXXw = 15$ e Manutenção $FXXi = 3$	
S1_6 e S2_6	Diminuição $FXXw = 2,1$ e Manutenção $FXXi = 3$	
S1_7 e S2_7	Igual ao CONTROLE $FXX = 3$	Sem mancha urbana, substituída pela vegetação predominante na RMSP
S1_8 e S2_8	Diminuição em ambos tipos de aerossóis $FXX = 2,1$	

3.6 Estratégia geral para análise dos resultados obtidos nas simulações.

Uma vez obtidos os resultados das simulações realizadas nas diferentes etapas da pesquisa, procedeu-se com a análise dos resultados. Para isso, foram definidas duas metodologias diferentes considerando os objetivos de cada conjunto de simulações. Os conjuntos relacionados com o processo de diagnóstico, calibração e validação, incluindo a obtenção CONTROLE, tiveram a sua análise feita a partir da comparação com os dados observados obtidos de estações de superfície e de produtos de precipitação por satélite. No caso dos CSs constituídos para o estudo do impacto dos aerossóis e da superfície urbanas, a análise ocorreu mediante processo de comparação entre as próprias simulações envolvidas entre elas e o CS CONTROLE. A seguir, são apresentados mais detalhes de ambas metodologias.

3.6.1 Metodologia para a análise dos resultados obtidos nas etapas de diagnóstico, calibração e validação.

Todos os CSs realizados nestas etapas foram analisados comparando os resultados obtidos pelo modelo e os observados nas diferentes redes de estações de medição de variáveis meteorológicas e de qualidade do ar espalhadas na RMSP, e que foram apresentadas no Item 3.2.1. Dessa forma, foi avaliada a acurácia de cada simulação e, ao mesmo tempo, se fez uma comparação entre resultados de simulações pertencentes ao mesmo CS, permitindo verificar o ganho por aumentar a resolução espacial.

Foram analisadas principalmente as variáveis prognosticadas diretamente relacionadas com as nuvens e com a precipitação, isso por se tratarem do foco da pesquisa, que é nos eventos extremos de precipitação. Foram empregados nas análises os produtos de estimativa de precipitação por satélite (ver Item 3.2.2) e todos os dados de precipitação das estações de superfície na RMSP que registram esta variável. Os pluviômetros do CEMADEN foram fundamentais para avaliar a assertividade na representação da precipitação tanto dos produtos derivados de satélite como do próprio sistema de modelagem CCATT-BRAMS-JULES, nos casos dos estudos aqui analisados.

Também foram analisadas as variáveis temperatura, umidade do ar, radiação solar global em superfície e a velocidade do vento. Nos CSs onde se fez a utilização do CCATT, as variáveis químicas estudadas foram principalmente MP_{2,5}, os gases O₃ e os NO_x, mas sobretudo com foco no MP_{2,5}, objeto de estudo do presente trabalho.

Devido ao tamanho da área urbanizada da RMSP é inevitável que existam dentro dela características diferentes, bem marcadas, de condições meteorológicas e químicas da atmosfera. Para auxiliar na análise, contou-se com um número máximo possível de estações de medição espalhadas pela RMSP. Entretanto, o fato de se ter simulações com resoluções espaciais de 10 e 5 km, onde a comparação ponto a ponto não faz sentido, dividiu-se a RMSP em 6 áreas de análise (as áreas estão especificadas na Figura 3.8, delimitadas por retângulos). Assim, a comparação é feita entre a média dos dados observados das diferentes estações que ficam dentro de cada área e a média dos dados simulados na respectiva sub-área.

Na Figura 3.21 são apresentadas todas as áreas com as respectivas estações. Entre parênteses, na cor vermelha, encontra-se o número de estações em cada área e para cada rede de estações. Observa-se que as áreas 2, que inclui principalmente o centro e norte do município de SP, e 5, que inclui a região do ABCD, são as de maior número de estações. Já a área 6, que cobre parte do sul da RMSP, é a com menor número de estações.

Figura 3.21 - Estações de monitoramento atmosférico (variáveis meteorológicas e químicas) no domínio da RMSP, destacando o órgão responsável e área em que se encontram. Os valores vermelhos entre parênteses indicam o número total de estações, seja por redes, seja por áreas ou seja por redes em cada área.

Áreas (Total)	Estações da CETESB (29) (incluem dados da química do ar)	Estações do CGE (32)	Outras (3)
1 (9)	(4) Carapicuíba; Pico de Jaraguá; Osasco; Marginal Tietê – Presidente Remédios.	(4) Santana do Parnaíba; Perus; Pirituba; Lapa.	Barueri (INMET)
2 (18)	(7) Nossa Senhora de Ó; Santana; Pinheiro; Cerqueira César; Parque Dom Pedro II; Mooca; Ibirapuera.	(10) Freguesia do Ó; Tremembé; Pinheiros; Sé – Anhembi; Santana/Tucuruvi – COMDEC; Vila Maria - Vila Guilherme; Sé – CGE; Mooca; Vila Mariana; Vila Prudente.	Mirador de Santana (INMET)
3 (10)	(4) Guarulhos – Paço Municipal; Guarulhos Pimentas; Itaim Paulista; Itaquera.	(6) São Miguel Paulista; Itaim Paulista; Penha – Rincão; Itaquera; Aricanduva - Vila Formosa; São Mateus.	---
4 (8)	(4) Cidade Universitário USP-IPEN; Taboão da Serra; Capão Redondo; Santo Amaro	(4) Butantã; M. Boi Mirim; Campo Limpo; Córrego de Itaim.	---
5 (15)	(9) Congonhas; Interlagos; São Caetano do Sul; São Bernardo Paulicéia; Santo André - Capuava; Diadema, São Bernardo – Centro; Mauá; Santo André – Paço Municipal.	(5) Santo Amaro; Jabaquara; Cidade Ademar; Ipiranga; Mauá - Paço Municipal.	Estação do IAG-USP
6 (4)	(1) Grajau - Parelheiros	(3) Riacho Grande; Capela do Socorro; Parelheiros-Barragens.	---

Fonte: Produção do autor.

Diferentes índices estatísticos foram utilizados para a comparação entre os CSs e entre eles e os dados observados. A seguir, são apresentados os detalhes sobre esses índices.

- erro médio (EM), mede a tendência do modelo em superestimar ou subestimar em relação ao dado observado (WILKS, 1995),

$$EM = \frac{1}{n} \sum_1^n (Sim(i) - Obs(i)) \quad (3.1)$$

- raiz do erro quadrático médio (REQM), é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que apresenta valores do erro na mesma dimensão da variável analisada (WILKS, 1995),

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (Sim(i) - Obs(i))^2} \quad (3.2)$$

- coeficiente de correlação de Pearson (CC), é a medida da força e direção da correlação linear entre duas variáveis. Este índice é sensível aos valores atípicos. Mede a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas. Pode tomar valores entre -1 e 1. Quanto mais próximo de -1: maior correlação negativa, quanto mais próximo de 1: maior correlação positiva e quanto mais próximo de 0: menor a correlação (WILKS, 1995).

$$CC = \frac{\sum_1^n (Sim(i) - Obs(i))^2}{|Sim(i) - Obs(i)| + |Obs - \hat{Obs}|} \quad (3.3)$$

Onde: Sim(i) – valores da simulação i, Obs – valores reais medidos nas estações, n – número total de dados, (\hat{Obs}) - Média dos valores reais observados nas estações.

Também foram usadas outras ferramentas de análises estatístico, como os diagramas de Taylor e histogramas de precipitação. Utilizou-se o software livre R (<https://www.r-project.org/>) para o processamento dos dados junto com o GrADS.

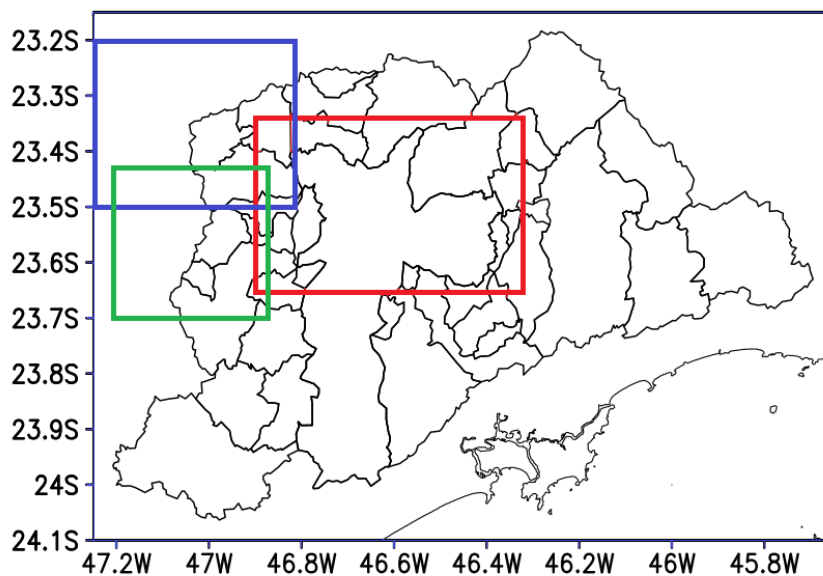
3.6.2 Metodologia para a análises dos testes sensibilidade.

Para os CSs com o objetivo de estudar a sensibilidade dos eventos extremos em relação a variações nas características dos aerossóis e da superfície urbana, as análises foram feitas a partir da comparação entre as simulações para diferentes cenários e também entre estes e as simulações CONTROLE. Esse último processo permitiu quantificar a influência que cada modificação específica inerente às simulações tinha sobre os eventos de precipitação na região de estudo.

O foco da análise nesta etapa foi a resposta da variável precipitação em relação às variações nos aerossóis e nas características da superfície, por tanto, aspectos como intensidade, duração e distribuição espacial dos picos de chuvas foram de suma importância. Junto com a variável precipitação, também foram analisadas outras que também estão relacionadas, diga-se, os hidrometeoros, vento em superfície, fluxos de calor sensível, temperatura e umidade.

Para o estudo de duração se selecionou uma área cobrindo o município São Paulo onde predomina a mancha urbana, retângulo vermelho da Figura 3.22. Para o estudo das concentrações de hidrometeoros se selecionaram áreas onde as diferenças entre a precipitação estimada pelo teste e o CONTROLE foram maiores para cada caso de estudo. Para o caso de estudo 01 essa área está delimitada pelo retângulo azul e para o caso 02 pelo retângulo verde, ambos representados na Figura 3.22.

Figura 3.22 - Subdomínio abrangendo a RMSP utilizado na análise da precipitação. Retângulo vermelho indica área utilizada para o estudo da duração da precipitação. Retângulos azul e verde indicam áreas onde se fez o estudo dos hidrometeoros, na análise dos resultados dos teste de sensibilidade, para os casos de estudo 01 e 02 respectivamente.



Fonte: Produção do autor.

3.7 Aprimoramento da representação de emissões utilizando a ferramenta PREP-CHEM-SRC.

Dado que a presente pesquisa constitui uma contribuição para a implementação de um sistema integrado de previsão de tempo meteorológico e químico de alta resolução, melhorias na resolução espacial dos dados de entrada para o CCATT-BRAMS-JULES são fundamentais. Outrossim, se faz necessário uma futura implementação do processo de retroalimentação entre o esquema de microfísica de dois momentos (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014) e os valores de concentração de aerossóis que são calculados pelo próprio sistema de modelagem em cada passo de integração. Para isso, é necessário que o módulo que resolve as características de remoção e dispersão dos aerossóis (tanto o denominado *SIMPES* como o *MATRIX* (FREITAS et al., 2017)) seja acurado, mas também é preciso que as emissões sejam o mais fiel possível à realidade. Dada essa necessidade, definiu-se como um dos objetivos deste trabalho o aprimoramento das representações das emissões urbanas em relação às espécies consideradas pelo PREP-CHEM-SRC.

Mesmo considerando a representação das emissões por município (Item 3.4.4), um grande avanço, acredita-se que a distribuição por vias representa um ganho significativo no resultado final das simulações de concentrações dos poluentes. Essa representação por vias de trânsito já tinha sido implementada no PREP-CHEM-SRC anteriormente como parte de um projeto levado a cabo no CPTEC/INPE para os Jogos Olímpicos de Verão no Rio de Janeiro (CHOVERT, 2016). Os resultados das simulações de previsão da qualidade do ar para o Rio de Janeiro foram melhores que os obtidos com a versão baseada em distribuição homogênea. O processo utilizado para implementar as emissões por vias na RMSP nesta pesquisa seguiu a mesma linha do executado para o caso Rio de Janeiro, mas com diferenças que foram necessárias para a RMSP. Para tal implementação foram executadas as seguintes tarefas:

- Processamento das informações de emissão veicular e industrial para cada município da RMSP (Item 3.7.1).
- Obtenção de mapas georreferenciados de cada tipo de via (classificadas como estruturais, primárias, secundárias, coletoras e locais) presentes na região de estudo. Esses mapas constituem dados de entrada para a ferramenta PREP-CHEM-SRC (Item 3.7.2).
- Processamento das informações de intensidade de tráfego para determinar a porcentagem de emissão que vai ser atribuída a cada tipo de via (Item 3.7.3).

- Modificações no código da ferramenta PREP-CHEM-SRC e análise dos resultados. As modificações permitiram distribuir as emissões locais do município nos diferentes tipos de vias tendo em consideração a porcentagem determinada na tarefa anterior (Capítulo 6).

3.7.1 Quantificação da emissão veicular e industrial por municípios da RMSP.

A CETESB disponibiliza no seu relatório anual, além dos valores de emissão total (Tabela 2.2), os valores de emissão veicular na RMSP para diferentes espécies químicas. A Tabela 2.1 contém esses dados para os anos entre 2016 e 2018. Esses valores, especificamente os correspondentes ao ano de 2017 (ano de referência nesta pesquisa), foram utilizados como dados de entrada no algoritmo que descreve a distribuição de emissões por vias implementada, e que será descrito neste documento no Capítulo 6. Importante destacar que no caso do MP, o dado de emissão não considera desgaste dos pneus, dos freios, ressuspensão de poeira do solo e nem aerossóis secundários, contabiliza apenas a emissão ocorrida na forma primária a partir do escapamento dos carros.

Os valores de emissão veicular apresentados na Tabela 2.1 são relativos à RMSP. No entanto, dada a necessidade da distribuição por vias, foi necessário primeiro quantificar as emissões por municípios. Para obter esse resultado, foi utilizado como peso na distribuição a quantidade de veículos da frota circulante em cada município e as porcentagens que cada tipo de veículo, divididos em pesados e não pesados, representam em relação à frota total. Também foram utilizados os valores apresentados no Item 3.1.2 referentes à fração que representam as emissões dos veículos pesados em relação à emissão total, isso, para cada espécie de poluente analisada (CO, NO_x, HC e MP). Assim, a emissão veicular associada a cada município, para cada espécie química, foi calculada da seguinte forma:

$$\mathbf{EVM}_{xy} = \mathbf{EVT}_x (\mathbf{PVPE}_x * \mathbf{PVPF}_y + \mathbf{PVNPE}_x * \mathbf{PVNPF}_y)$$

Onde:

\mathbf{EVM}_{xy} - Emissão veicular da espécie x no município y .

\mathbf{EVT}_x - Emissão veicular total da espécie x na RMSP.

\mathbf{PVPE}_x - Porcentagem que representa a emissão da espécie x associada a veículos pesados na RMSP, em relação ao total da emissão veicular.

PVNPE_x - Porcentagem que representa a emissão da espécie *x* associada a veículos não pesados na RMSP, em relação ao total da emissão veicular.

PVPF_y - Porcentagem que representa o total de veículos pesados no município *y* em relação ao total da mesma categoria para a RMSP.

PVNPF_y - Porcentagem que representa o total de veículos não pesados no município *y* em relação ao total da mesma categoria para a RMSP.

Em relação à emissão antrópica de origem industrial, a CETESB também disponibiliza esses dados para a RMSP, e utiliza como ano de referência o de 2008 (Tabela 3.10). Para as espécies NO_x, HC e MP os dados foram estimados baseados no Plano de Redução de Emissão de Fontes Estacionárias, elaborado no ano de 2014. Esses valores foram obtidos a partir de um inventário feito para diferentes indústrias da região (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB., 2020).

Tabela 3.10 - Valores das emissões industriais totais das principais espécies poluentes na RMSP tomando como ano de referência o 2008 (1000 ton/ano) e baseados no Plano de Redução de Emissão de Fontes Estacionárias.

Espécies	CO	HC	NO _x	MP	SO _x
Emissão industrial na RMSP	4,18	5,6	26,1	3,57	5,59

Fonte: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. (2020).

Para distribuir esses valores por municípios, e dada a falta de informação em relação a quais indústrias foram inventariadas, foi utilizada a informação da Fundação Estadual de Análise de Dados (SEADE) (www.seade.gov.br/produtos/pib-municipal), que emite relatórios com os dados do Produto Interno Bruto (PIB) em diferentes unidades administrativas. Empregaram-se especificamente os dados de Valor Agregado da Indústria em cada município da RMSP para o ano de 2015, últimos disponibilizados. Esses valores foram utilizados como peso para a distribuição das emissões ao determinar a proporção do valor agregado de cada município em relação ao total para a RMSP.

3.7.2 Processamento dos dados da malha viária na RMSP.

Uma vez processada a informação das emissões, tanto veiculares como indústrias disponíveis, se procedeu a realizar o processamento das informações sobre a malha viária na região para obter os valores associados aos municípios que constituem a área de estudo. Para cumprir esse objetivo foi necessário obter informação georreferenciada dos diferentes tipos de vias.

Foram obtidos de diferentes fontes os arquivos em formato *shapefile* com informações sobre as vias nas áreas de estudo. Como resultado final, foi possível obter arquivos com as coordenadas em graus decimais dos pontos, localizados sobre as vias de mobilidade, que foram distribuídos considerando diferentes resoluções espaciais.

Para o processamento dos dados das vias foi utilizado um sistema de informação geográfica, o software ArcGis para área de trabalho(<https://www.arcgis.com/features/index.html>). Este é empregado para trabalhar com mapas e informações geográficas, permite analisar informações mapeadas, compartilhar e administrar bases de dados entre outras funcionalidades. A ferramenta conta com várias aplicações, as utilizadas neste trabalho foram a *Arc-Map* e *ArcToolbox*. A primeira aplicação permite visualizar e criar mapas, editar e consultar dados geoespaciais. A segunda contém as ferramentas de geoprocessamento, conversão de dados e análises que permitem, entre outras opções, trocar as coordenadas dos dados e as suas características geométricas.

Com o ArcGis foi possível converter os dados disponíveis em formato de linhas contínuas (as vias de mobilidade) para formatos de pontos com diferentes resoluções espaciais. O processamento teve que ser feito para cada município em estudo e para cada um dos tipos de vias de mobilidade que foram determinados segundo as características de tráfego dessas vias, processo descrito a seguir.

Cada um dos arquivos em formato *shapefile* processados, contendo dados associados às vias, possui informações classificadas de formas diferentes. Enquanto o arquivo para o município de São Paulo tem 8 tipos diferentes de vias, o disponibilizado pelo CEM para os restantes 38 municípios, por ser uma base de dados para outros fins, a quantidade é de 39 tipos de logradouros. Devido a essas diferenças, foi necessário realizar um análise de toda a informação e agrupar em conjuntos com características semelhantes, e que favorecessem a posterior implementação do módulo de distribuição das emissões, por tipos de vias de mobilidade na ferramenta PREP-CHEM-SRC.

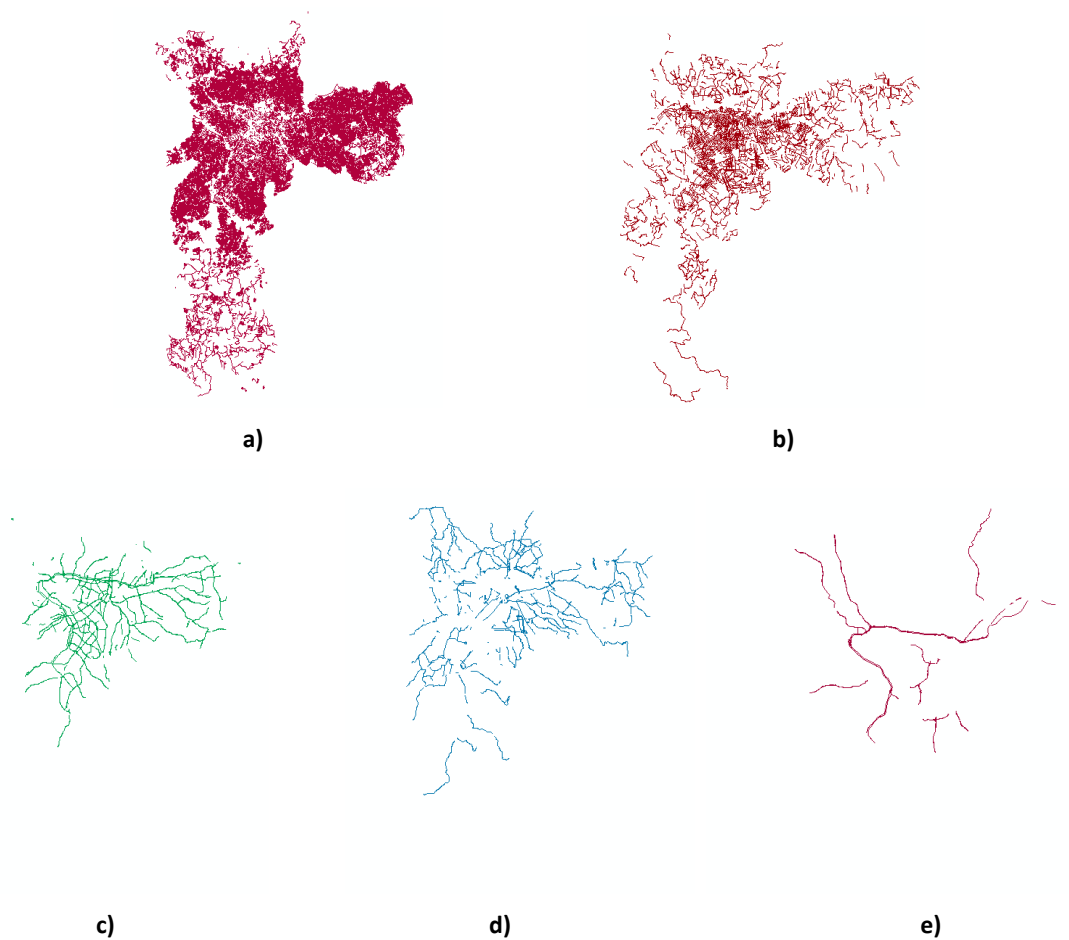
Esse processo já tinha sido feito anteriormente no projeto para Rio de Janeiro (CHOVERT, 2016) e neste trabalho decidiu-se continuar com a mesma classificação utilizada naquele momento, pois já estavam definidas as características comuns de cada tipo de via em relação ao número de eixos, tráfego entre outras. Sendo assim se mantiveram cinco categorias diferentes de vias: Estruturais, Arteriais Primárias, Arteriais Secundárias, Coletoras e as vias Locais. Para o município de São Paulo foi feita a análise dos 8 tipos diferentes de vias e agrupadas por categorias seguindo esse padrão. Na Tabela 3.11 são especificadas as categorias definidas neste trabalho e os tipos de vias do município de São Paulo que foram agrupados em cada uma delas.

Tabela 3.11 - Categorias de vias e tipos associados para o município de SP.

Categorias das vias	Tipos de vias no arquivo <i>shapefile</i> para o município de São Paulo.
Estrutural	Trânsito Rápido
Primárias	Arteria I
Secundárias	Arterial II e Arterial III
Coletoras	Coletora I e Coletora II
Local	Local

Na Figura 3.23 são mostrados os conjuntos de vias por categorias para o município de São Paulo. As vias locais continuam sendo as de maior número na sua totalidade, seguidas pelas vias coletoras.

Figura 3.23 - Malha viária do município de São Paulo separada por categorias. a) Vias Locais. b) Vias Coletoras. c) Vias Primárias. d) Vias Secundárias. e) Vias Estruturais. Os dados foram disponibilizados pela Secretaria de Transporte da Prefeitura de São Paulo



Fonte: Produção do autor.

Para agrupar as vias nos restantes 38 municípios da RMSP segundo as cinco categorias definidas anteriormente, foi feito um estudo comparativo objetivo. A partir dos 39 tipos de logradouros definidos no arquivo disponibilizado pelo Centro de Estudos da Metrópole, foi feita uma comparação entre os colocados para o município de SP e os utilizados para fazer a análise também para o município de SP, porém oferecidos pela Prefeitura. Dessa forma foi possível estabelecer analogias e conseguir agrupar a maioria dos tipos de logradouros. No entanto, dada a dificuldade encontrada ao tentar diferenciar as categorias Coletoras e Secundárias, principalmente por serem municípios com características de malhas viárias menos desenvolvidas e não tão complexas, decidiu-se tomar estas duas categorias como uma só, e assim diminuir os erros. Então, para a RMSP, excetuando o município de São Paulo, foram consideradas só quatro categorias de vias.

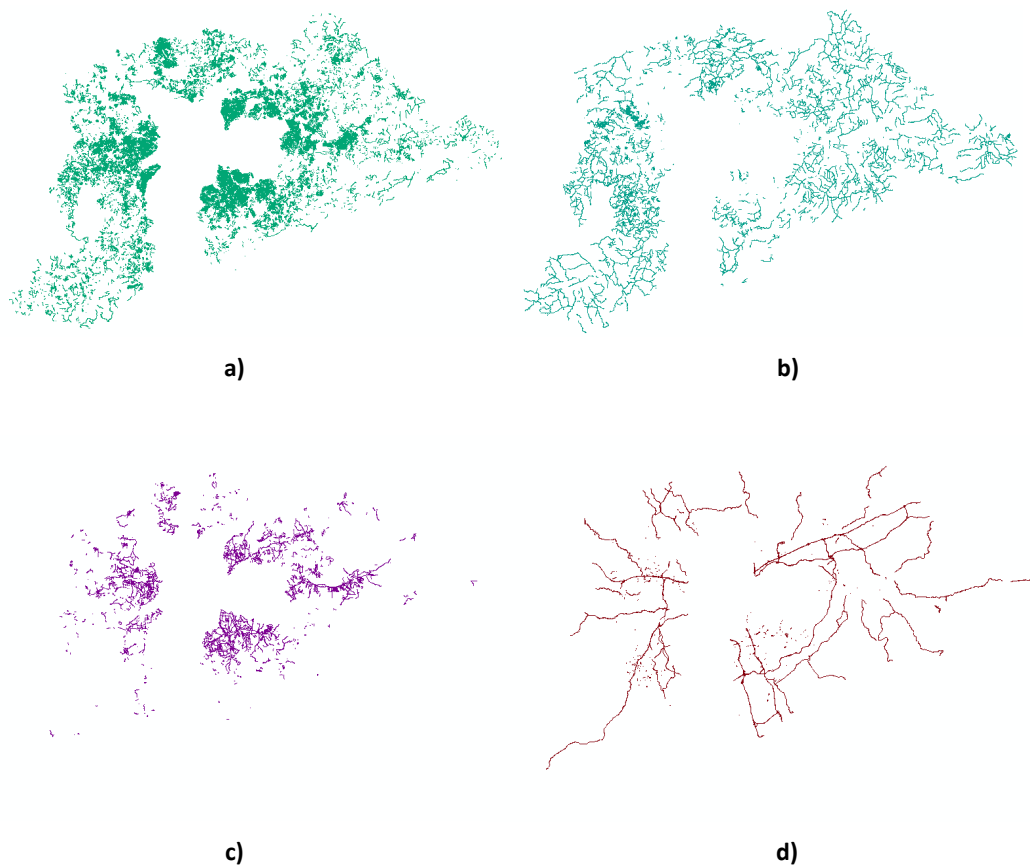
Alguns tipos de vias definidos no arquivo do CEM, e que não estavam localizados no município capital e por tanto não era possível fazer a comparação, foram analisados de forma detalhada e independente e colocados na categoria de maior afinidade. Assim foi possível fazer toda a redistribuição de forma aproximada. A seguir, na Tabela 3.12 são mostrados os tipos de vias, segundo o arquivo *shapefile* do CEM, que foram considerados em cada uma das 4 categorias pré-definidas.

Tabela 3.12 - Categorias de vias e tipos associados para a RMSP, excetuando o MSP.

Categorias das vias	Tipos de vias no arquivo <i>shapefile</i> para a RMSP, excetuando o MSP
Estrutural	CV (Complexo Viario) - LO (Rodovia Dutra) MR - (Marginal) RA (Rodoanel) - RV (Rodovia)
Primárias	AV (Avenida) - BT (Baia de terminal) - VD (Viaduto)
Secundárias - Coletora	ES (Estrada) - AL (Alameda)
Local	LG (Largo) - R (Rua) - VA (Via) - PS (Passagem)

Na Figura 3.24 estão representadas as vias pertencentes a cada uma das 4 categorias para a região em análise. Ao serem tratadas as Coletoras e Secundárias como uma categoria só, a extensão total e a densidade das vias para a categoria resultante é bem superior às pertencentes às categorias Primárias e Estruturais. Os dados foram disponibilizados pelo Centro de Estudos da Metrópole.

Figura 3.24 - Malha viária dos municípios da RMSP, excetuando São Paulo, separada por categorias. a) Vias Locais, b) Vias Coletoras-Secundárias, c) Vias Primárias, d) Vias Estruturais.



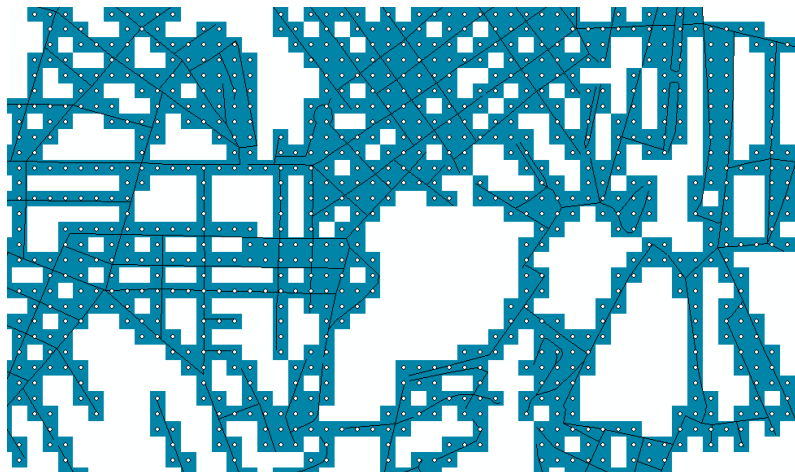
Fonte: Produção do autor.

A metodologia executada para obter os produtos com os dados georreferenciados das vias foi similar ao tratamento dos arquivos pertencentes às duas subáreas em estudo, o município de São Paulo e o restante da RMSP. Em todos os casos o objetivo final foi obter arquivos em formato *ASCII* com as coordenadas em graus decimais associadas a diferentes pontos localizados sobre os diferentes tipos de vias de mobilidade. Esses arquivos, uma vez obtidos, foram utilizados diretamente pela ferramenta PREP-CHEM-SRC para realizar a distribuição espacial das emissões nas regiões de interesse, aspecto este explicado com profundidade no Capítulo 6.

A seguir, é apresentado um resumo dos principais passos executados com o software ArcGis para o processamento da informação georreferenciada das vias e obtenção dos produtos finais:

- A informação das vias por categorias é separada para cada município que constitui nossa área de estudo.
- Com ajuda da aplicação *ArcToolbox* foi feita a conversão dos mapas de vias a mapas em formato *raster*. Nesse processo foi possível discretizar as linhas contínuas que formam as vias e é nele que se selecionou a resolução do que seria uma espécie de pixel que foi utilizado para cobrir todo o mapa original de vias.
- Posteriormente, se fez a conversão dos mapas em formato *raster* para mapas em formatos de pontos utilizando a mesma aplicação do passo anterior. Cada ponto é colocado no meio do pixel e, portanto, a distância entre eles é a mesma que a resolução definida anteriormente. Quanto melhor a resolução melhor é a representação das vias pelos pontos, pois, estes tendem a ficar localizados mais sobre as linhas. Na Figura 3.25, é apresentado um exemplo do mapa de pontos sobreposto no mapa de *raster* para a categoria de vias estruturais no município de São Paulo.

Figura 3.25 - Exemplo da estrutura final dos mapas com os *pixels* e pontos. Cada quadrado na cor azul é um pixel, os pontos estão localizados no centro do quadrado na cor branca. As linhas negras representam as vias de mobilidade.



Fonte: Produção do autor.

- Posteriormente, efetuou-se a inclusão das coordenadas geográficas em graus decimais correspondentes a cada ponto.
- A partir da tabela de atributos de cada mapa de pontos foi possível exportar os dados para um arquivo em formato *txt* com a primeira fila contendo o número total de pontos e as filas posteriores com duas colunas, a primeira com a coordenada da longitude e a segunda da latitude de cada ponto (Figura 3.26).

Figura 3.26 - Exemplo da estrutura final dos arquivos com a informação georreferenciada das vias de mobilidade. Primeira linha o total de pontos, e as linhas seguintes nas duas colunas representam coordenadas longitude e latitude, respectivamente.

```
1584
-46.549798434600000; -23.357094455100000
-46.549814169199998; -23.358448917400001
-46.551296968800003; -23.359788837800000
-46.549829905099998; -23.359803379500001
-46.551312720699997; -23.361143298599998
-46.552795566100002; -23.362483202000000
```

No meio desses processos foi necessário realizar trocas nas projeções dos mapas para conseguir os tipos de coordenadas que satisfazem as necessidades específicas de cada passo descrito anteriormente. Trabalhou-se com as projeções **SAD_1996_UTM_ZONE_23Z** e **GCS_WGS_1984** (<https://spatialreference.org/ref/epsg/wgs-84/>).

Pensando que futuras simulações podem ser realizadas com os diferentes modelos de PNT, com domínios que incluem a mesma região de estudo tratada neste trabalho, foi aplicada a metodologia anteriormente descrita de forma repetitiva para 4 resoluções espaciais diferentes. Foram gerados arquivos com informações georreferenciadas para cada categoria de vias em cada município considerando um espaçamento entre pontos de diferentes tamanhos. Foram considerados os seguintes espaçamentos 200 m, 150 m, 100 m e 50 m. Todos esses arquivos são guardados no endereço */extra/UserData/Road* dentro da pasta principal da versão do PREP-CHEM-SRC trabalhada. Os nomes dos arquivos têm o seguinte formato: *CategoriaDeVia_SiglaAssociadasAoMunicípio_ResoluçãoEmMetrosDosDados.txt*. Para o caso específico de se trabalhar com resolução de 50 m no nome deve aparecer 050.

3.7.3 Emissão segundo tipo de vias para cada município.

Com os dados de emissão veicular por município, obtidos a partir dos procedimentos descritos no Item 3.7.1, e os de vias separadas por categorias, se fez necessário determinar a porcentagem da emissão municipal que deve ser atribuída a cada categoria das vias. Dada a falta de informação sobre o tráfego em toda a região de estudo se chegou a um método geral aplicável a todos os municípios para determinar essas porcentagens. Foram utilizados dados de tráfego para o município de Rio de Janeiro já utilizados anteriormente (CHOVERT, 2016). Na Tabela 3.13 é apresentada a informação sobre o número médio de veículos que transitam por cada tipo de via especificada anteriormente no Rio de Janeiro, dados utilizados aqui para a RMSP.

Tabela 3.13 - Categorias de vias e número médio de veículos que transitam por elas num dia útil típico no município Rio de Janeiro.

Categorias	Estrutural	Primárias	Secundárias	Coletoras	Locais	Col-Sec
Nº de veículos	99397	46077	42424	30371	28939	36397

Fonte: Diretoria de Desenvolvimento e Gerência de Informações de Tráfego do Rio de Janeiro (2017).

Com os valores médios do volume de tráfego e a quantidade de pontos total que cada conjunto (categoria) de vias têm, realizou-se o cálculo final das porcentagens da emissão veicular total associada às categorias de vias da seguinte forma para cada município:

$$PEC_j = \left(\frac{TFC_j * PNC_j}{\sum_{i=1}^5 TFC_i * PNC_i} \right) * 100$$

onde:

- **PEC_j** - Porcentagem da emissão veicular total do município que será associada as vias agrupadas na categoria *j*.
- **TFC_j** - Valor médio de tráfego, especificados na Tabela 3.13, associado à categoria *j*.

- **PNC_j** - Quantidade de pontos associados à categoria j de vias para o município, pode ser utilizada qualquer resolução sempre que seja a mesma para todas as categorias pois a quantidade de pontos varia proporcionalmente entre as resoluções diferentes
- **TFC_i** - Valores de tráfego, especificados na Tabela 3.13, para todas as categorias de vias, desde a categoria $i=1$ até 4 (38 municípios da RMSP) ou 5 (para o município de São Paulo) segundo seja o caso.
- **PNC_i** - Quantidade de pontos associados às categorias de vias, desde a categoria $i=1$ até 4 (38 municípios da RMSP) ou 5 (para o município de São Paulo) segundo seja o caso.

Na Tabela 3.14 são apresentadas as porcentagens calculadas para os municípios de São Paulo e Cotia, Mairiporã.

Tabela 3.14 - Categorias de vias e porcentagens da emissão total correspondente segundo o município, dados para São Paulo, Cotia e Mairiporã.

Categorias/Municípios	São Paulo	Cotia	Mairiporã
Estrutural	8%	11%	17%
Primárias	11%	5%	9%
Secundárias	12%	-	-
Coletoras	19%	-	-
Local	51%	52%	40%
Sec-Col	-	32%	34%

Entende-se que cada município tem suas características específicas de tráfego, e isso depende da configuração da estrutura viária, da frota e de outros fatores. No entanto, a falta de informação detalhada obrigou a definição de uma metodologia que, mesmo sem ser o ideal, permite determinar valores aproximados de emissão. Outro aspecto, é que neste método não é considerado de forma explícita as diferenças nas emissões dos veículos a diferentes velocidades.

4 ESTUDO DE CASOS: DIAGNÓSTICO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MODELAGEM.

Neste Capítulo são apresentados os resultados mais relevantes obtidos no processo de diagnóstico, calibração e validação do sistema CCATT-BRAMS-JULES na sua versão 5.4. Para isso foram analisados os diferentes conjuntos de simulações apresentados na Seção 3.5.2. Inicialmente são apresentados os resultados mais relevantes relacionados com a calibração dos parâmetros associados aos aerossóis atmosféricos utilizados na microfísica de nuvens, Seção 4.1 . Posteriormente é feita a análise e validação dos resultados das simulações CONTROLE, considerando algumas variáveis meteorológicas, principalmente a precipitação, sendo que na Seção 4.2 o foco é no caso de estudo 01 e na Seção 4.3 no caso de estudo 02. Ao mesmo tempo em que são analisadas simulações CONTROLE também é avaliado o desempenho do sistema BRAMS-JULES na representação dos casos de estudo a partir de mudanças nas condições iniciais e de contorno.

Os resultados das simulações mencionadas na Tabela 3.4, relacionadas com o diagnóstico inicial da nova versão, não serão apresentados de forma explícita neste Capítulo pois eles serviram apenas como indicativo para a utilização da nova versão, de modo que optou-se por não incluir a sua discussão no presente texto. No entanto, vale ressaltar que, do ponto de vista computacional, depois de alguns ajustes a nova versão funcionou corretamente. Foi possível aumentar o passo temporal, o que diminuiu o custo computacional, sem causar mudanças significativas na representação dos sistemas, isso quando comparados os resultados com os obtidos na versão anterior do modelo. As mudanças no novo núcleo dinâmico foram corretamente implementadas melhorando a eficiência na integração.

4.1 Calibração dos parâmetros dos aerossóis atmosféricos associados à microfísica de nuvens.

A análise dos CS da série C (Tabela 3.5) mostrou que o horário das 12:00 UTC do dia 05/06/2017 (CS_C4) apresentou os melhores resultados na simulação do sistema em estudo, isso quando se utilizou a microfísica de 1 momento (não considera aerossóis) em todas as simulações do conjunto. Posteriormente, foram realizados os CS que tinham como objetivo selecionar a melhor combinação de parâmetros dos aerossóis, isto é, higroscopicidade e raio médio das partículas (Tabela 3.5). Foram 4 conjuntos de simulações, em cada um deles se utilizou uma das combinações possíveis dos parâmetros. A seguir são apresentados os resultados obtidos para a precipitação em cada um dos CS.

Na Figura 4.2 é apresentado o diagrama de Taylor com os resultados dos diferentes índices estatísticos, enquanto na Tabela 4.1 os valores dos índices são especificados. Os CS da série D, associados às combinações de lm e representados com números em azul de 1 a 4, subestimaram a precipitação em relação aos dados observados em todos os casos exceto quando se utilizou a combinação $lm=31$ (CS_D3). Nesse caso houve uma superestimativa e o viés foi de 23,4 mm, o maior valor absoluto entre os 4. O menor viés se obteve no CS_D4 e foi de -17,0 mm.

Os valores do índice REQM mostraram a mesma configuração, maior valor para o CS_D3 com 29,1 mm e menor valor para o CS_D4 com 23,9 mm. Já em relação ao coeficiente de correlação, se observa no diagrama que os conjuntos de simulações D1, D2 e D4 estão quase sobre a mesma linha concêntrica que sinaliza o valor 0,2 desse índice, considerado não satisfatório. O CS_D3 apresenta um valor do coeficiente relativamente melhor, alcançando 0,34. O desvio padrão (DP), que dá uma estimativa da dispersão dos dados, mostra valores semelhantes para todos os CS, com destaque para o caso em que se utiliza $lm=32$ com um valor de 13,5 mm, muito perto do observado que foi de 13,3 mm. O pior valor relativo para o DP foi o calculado para o CS_D3 (16,5 mm).

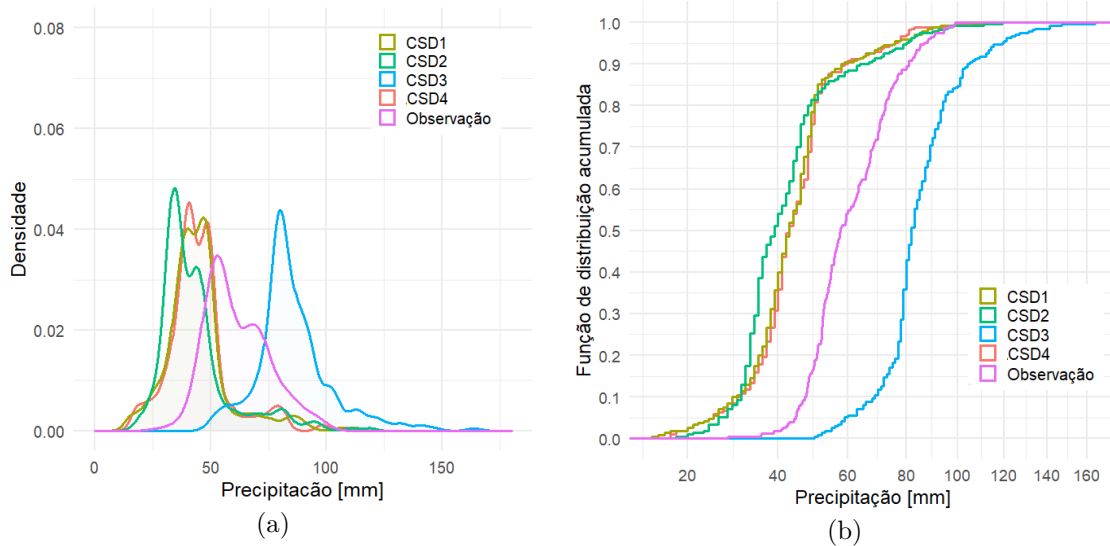
Na Figura 4.1 são representados os acumulados totais de precipitação no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho, para as 228 estações utilizadas no caso de estudo em análise. À esquerda encontra-se a representação da densidade dos dados observados por intervalo de precipitação e também para cada CS da série D considerando os mesmos pontos onde se localizam as estações. À direita os dados da função de distribuição acumulada para os mesmos conjuntos de dados. É possível notar que um maior número de estações registrou valores de precipitação entre 50 e 55 mm. Os valores de precipitação total observados variaram entre 25 mm e 100 mm considerando todas as estações dentro da RMSP. Quando comparadas as representações dos CS com o observado, nota-se que os CS_D1, com $lm=21$, e CS_D4, com $lm=32$, apresentam os resultados mais parecidos com o observado mesmo que com picos deslocados para volumes menores de chuva. O CS_D3, com $lm=31$, apresentou um pico de densidade em um valor acima de 75 mm o que explica a superestimação mencionada anteriormente. Os outros três CS tiveram picos de densidade em valores menores que 50 mm justificando também a subestimação.

Com exceção do CS_D3, percebe-se que o modelo é capaz de capturar o máximo primário e o máximo secundário nos dados de densidade. Outra característica que pode ser observada nas gráficas de densidade é que o modelo tende a concentrar os volumes da chuva nas estações em torno dos picos, isto é, a chuva cai na RMSP de forma mais homogênea, enquanto observação apresentar uma distribuição mais larga, sugerindo uma heterogeneidade na distribuição da chuva maior dentro da RMSP.

O gráfico da direita, que complementa a informação anterior, mostra características semelhantes. Os conjuntos de simulações D1, D2 e D4 mostram maiores frequências acumuladas para volumes menores de precipitação quando comparados com os dados observados, o contrário se evidencia no CS_D3. Aproximadamente 50 % dos valores para os CS_D1 e CS_D4 estiveram entre 40 mm e 60 mm, o CS_D2 teve aproximadamente 35 % nesse intervalo e o CS_D3 aproximadamente 5 %. Entre os dados observados, aproximadamente 52 % correspondem ao intervalo entre 40 mm e 60 mm. Já para o intervalo entre 60 mm e 80 mm, os CS_D1 e CS_D2 têm aproximadamente 5 % dos registros, CS_D3 aproximadamente 30 %, CS_D4 aproximadamente 7 %, e na série de dados observados aproximadamente 35 % das estações registraram valores nesse intervalo. Destacar que o CS_D3 possui aproximadamente 50 % dos registros no intervalo entre 80 mm e 100 mm.

Ao comparar os conjuntos D1 e D2, que consideram o mesmo parâmetro para o raio médio das partículas, temos que o aumento da higroscopicidade dos aerossóis provocou uma diminuição nos valores de precipitação total acumulada registrados. O mesmo se observa ao comparar os conjuntos D3 e D4, no entanto, nesse caso a diminuição é mais evidente. Outrossim, quando comparados os conjuntos com o mesmo valor de higroscopicidade, D1 e D3 ou D2 e D4, se observa que à medida que aumenta o raio médio das partículas dos aerossóis, aumenta também a densidade de pontos com registros de precipitação acumulada mais elevada. No caso da comparação entre o CS_D2 e CS_D4, ambos com higroscopicidade maior que os outros dois CS, as diferenças ao mudar o rádio foram menores.

Figura 4.1 - Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados dos CS da série D no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho, especificamente para as simulações no domínio de 1 km de resolução espacial. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.



Fonte: Produção do autor.

Em geral, e como resposta ao objetivo desta etapa, a melhor combinação entre as utilizadas para avaliar o desempenho do modelo foi a associada ao CS_D4 com $lm = 32$. Os valores de ambos parâmetros considerados no CS_D4 foram utilizados em todas as simulações para os domínios de 5 km e 1 km analisadas nas próximas seções. Isso significa que no modelo foi considerado que o raio médio das partículas de aerossóis pertencente ao intervalo entre 0,02 - 0,04 micrômetros e no caso da higroscopicidade das partículas assumiu-se intervalo entre 0,2 e 0,4.

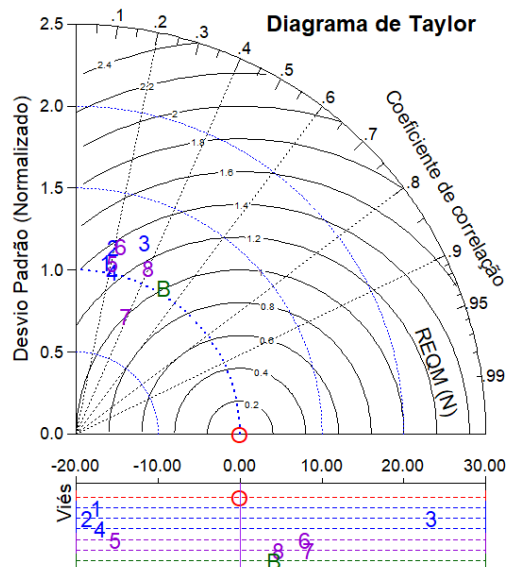
A próxima etapa consistiu em determinar os valores apropriados de concentrações de aerossóis atmosféricos a serem utilizados pela microfísica, uma vez que os dados do GOCART, utilizados pelo modelo, subestimam os dados observados nas estações da CETESB. Os CS realizados nesta fase são mostrados na Tabela 3.6 e são da série E. No diagrama de Taylor da Figura 4.2 estão representados os resultados das simulações com resolução espacial de 1 km feitas em cada um dos CS, sinalizados com os números do 5 ao 8 em cor roxo e também a letra B em cor verde que é específica para o CS_E4. No diagrama se observa que em todos os casos desta etapa se obteve uma superestimativa da precipitação, exceto no caso em que as concentrações dos aerossóis foi aumentada em 50 % ($FXX = 1,5$). Para esse caso, o viés foi de -15,2 mm, as outras simulações tiveram valores de viés associados entre 4,2 mm e 8,5 mm, sendo o CS_E4 a apresentar os melhores resultados. Em todos os casos os valores para esse índice foram melhores que os obtidos nas simulações da série D.

Os valores do coeficiente de correlação ainda podem ser considerados baixos para os casos em que FXX foi igual a 1,5 e a 2,5 (CS_E1 e CS_E2, respectivamente), com valores que não ficaram acima de 0,3. Nas outras três simulações os valores do CC ficaram acima de 0,35 com destaque novamente para o CS_E4 que alcançou um valor de 0,51, o melhor entre todas as simulações realizadas até essa fase da pesquisa. Em relação ao REQM, características semelhantes são observadas. Os valores para esse índice variaram entre 14 mm e 23 mm para os CS_E4 e CS_E1, respectivamente. Tanto ao analisar o CC como o REQM, se observa que na medida em que aumentamos a concentração dos aerossóis os valores dos índices associados às simulações melhoram gradativamente até o caso em que $FXX = 3$ (CS_E4), e posteriormente se observa um piora relativa. Isso significa que, o aumento das concentrações dos aerossóis até alcançar o valor definido pela utilização do fator $FXX = 3$ favorece a melhora na representação da precipitação. No entanto, ao utilizar um valor de FXX superior, como no caso $FXX=3,1$ (CS_E5), se observa uma mudança na tendência. Vale destacar que, apesar dos resultados apresentados estarem focados na precipitação, foram analisadas também outras variáveis meteorológicas que apresentaram resultados semelhantes aos expostos aqui.

No caso do desvio padrão, novamente o CS_E4 apresentou o valor (13,5 mm) mais próximo do obtido para os dados observados (13,3 mm). No diagrama se observa que as simulações identificadas com a letra B (CS_E4) e com o número 5 (CS_E1) são as localizadas mais próximas da linha concêntrica de cor azul que indica o valor unitário do desvio padrão normalizado e o ideal para ser alcançado. Nesse mesmo diagrama é possível identificar que a simulação identificada com o número 7 (CS_E3) foi a que apresentou os piores resultados para este índice (com DP = 10,4 mm), quando considera do todos os CS da série E, e só é melhor que o CS_D3 da série D analisada anteriormente.

No geral, depois da análise estatística, são evidentes as melhorias na representação da precipitação pelo modelo com o aumento dos aerossóis e mantendo um valor de $lm=32$. Para os CS em que foram utilizados valores de FXX iguais ou próximos de 3 foram obtidos os melhores resultados.

Figura 4.2 - Diagrama de Taylor com a representação do índice de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação. No diagrama 1-> CS_D1, 2->CS_D2, 3-> CS_D3, 4->CS_D4, 5-> CS_E1, 6-> CS_E2, 7-> CS_E3, B-> CS_E4 e 8-> CS_E5. Todas as simulações destas séries consideram a precipitação total acumulada no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho.



Fonte: Produção do autor.

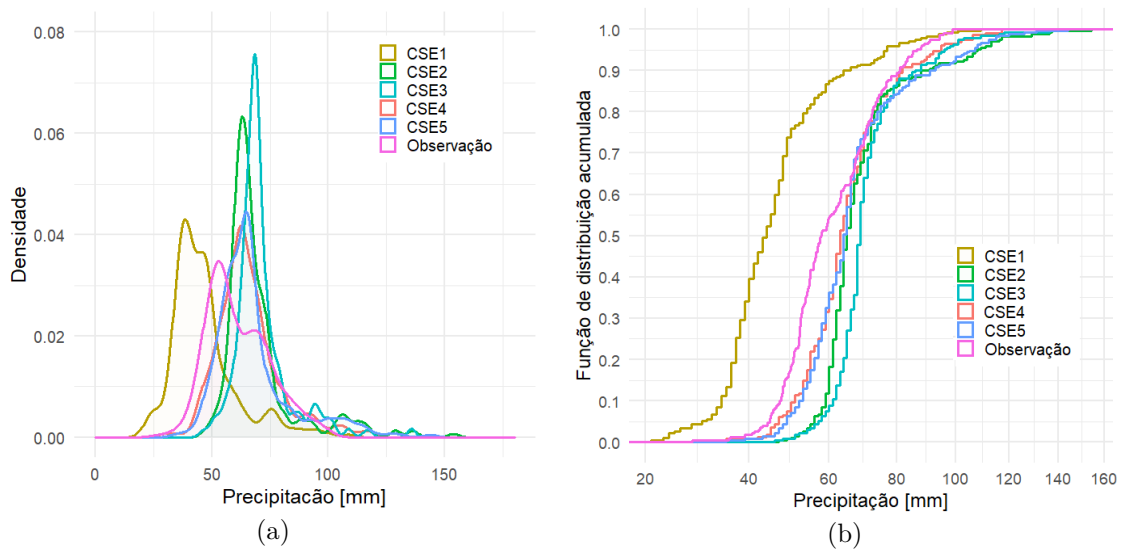
Tabela 4.1 - Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados aos CS das séries D e E ao ser comparados com os dados registrados nas estações em superfície. DP-> Desvio padrão, REQM-> Raiz do erro quadrático médio, CC-> Coeficiente de correlação, EM-> Erro Médio.

Dados\Índices	DP	REQM	CC	EM(Viés)
Estações	13,3	0	1	0
CS_D1 (1)	14,2	24,8	0,17	-17,4
CS_D2 (2)	15,4	26,1	0,20	-18,7
CS_D3 (3)	16,5	29,1	0,34	23,4
CS_D4 (4)	13,5	23,9	0,22	-17,0
CS_E1 (5)	14,1	23,0	0,21	-15,2
CS_E2 (6)	15,7	19,8	0,23	8
CS_E3 (7)	10,4	15,8	0,39	8,5
CS_E4 (8)	13,8	14,0	0,51	4,2
CS_E5 (8)	14,7	16,1	0,40	4,7

Na Figura 4.3 é mostrada a representação da distribuição, a partir da densidade, e a frequência acumulada dos valores de precipitação total observados tanto nas estações como nos pontos da grade do modelo onde elas se encontram para o CS da série E. Na simulação para o domínio de 1 km de resolução espacial, o CS_E1 foi o único que subestimou a observação, se observa que o valor de aproximadamente 25 mm de precipitação acumulada foi o registrado no maior número de pontos dos 228 analisados (Figura 4.3(a)). Esse pico ficou em torno de um valor que é quase a metade do valor em torno do qual o pico dos dados observados (entre 50 mm e 55 mm), identificado pela linha roxa. Nas outras 4 simulações os picos ficaram em acumulados entre 60 mm e 70 mm, mas variando no valor da densidade. No caso do CS_E3, o valor da densidade para os acumulados onde se registrou o pico foi de aproximadamente 0,075 (valor normalizado), o maior entre todos os registrados. Maior acumulados de valores ao redor do pico explica o baixo valor de desvio padrão observado para esta simulação. A simulação CS_E4 foi a que teve uma distribuição dos acumulados de precipitação simulados mais próxima dos observados. Nesta análise não se considera o aspecto espacial e sim só o quantitativo ao se comparar os valores registrados sem considerar a localização exata dos pontos. No entanto, ao ponderar os valores dos índices CC e REQM, é possível complementar as análises e entender que os resultados se combinam para mostrar qual CS teve os melhores resultados.

Na Figura 4.3(b) onde se mostra a distribuição de frequência acumulada os resultados são análogos aos obtidos na Figura 4.3(a). O CS_E1 mostrou os piores resultados em relação aos dados observados, e as outras 4 simulações com resultados semelhantes mais próximos dos observados. Aproximadamente 87 % dos valores registrados na simulação com $FXX=1,5$ foram abaixo de 60 mm. Para $FXX=2,5$, $FXX=2,9$, $FXX=3$ e $FXX=3,1$ a quantidade de pontos que registraram valores de precipitação total acumulada abaixo de 60 mm representaram aproximadamente 12 %, 9 %, 34 % e 35 % do total, respectivamente. Já para os dados observados nas estações esse valor foi de aproximadamente 55 %.

Figura 4.3 - Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados dos CS da série E no período compreendido entre as 12:00 UTC do dia 5 de junho e as 15:00 UTC do dia 6 de junho, especificamente para as simulações no domínio de 1 km de resolução espacial. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.



Fonte: Produção do autor.

Depois de feita a análises de todas as simulações até aqui concluiu-se o processo de calibração do sistema BRAMS-JULES e foram definidos os parâmetros que seriam utilizados nas simulações seguintes. Ficam definidos então os parâmetros l e m associados com higroscopicidade e raio médio das partículas de aerossóis atmosférico a ser utilizados na região de estudo ($l = 3$ e $m = 2$).

Também se definiu o fator de incremento das concentrações de aerossóis em relação com os dados lidos do GOCART ($FXX = 3$). Dessa forma, o CS_E4 foi considerado como CONTROLE para o caso de estudo 01 ocorrido no mês de junho de 2017.

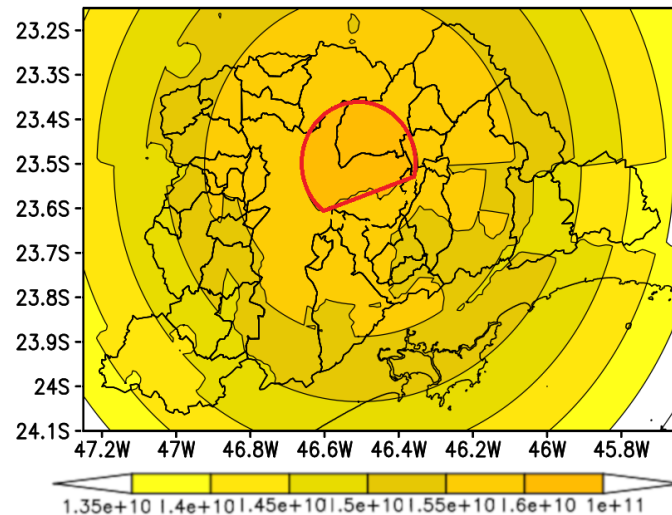
Esses valores de referência relacionados com a microfísica de nuvens aqui estabelecidos foram utilizados em ambos casos de estudo, pois definem características que podem ser consideradas representativas para a região em análise. As mudanças nas concentrações dos aerossóis observadas nos diferentes meses do ano, e que dependem dos regimes de chuva, vento, temperatura e radiação, já estão incluídas nos dados do GOCART. Nas simulações aqui realizadas só se aplica o fator de variação (aumento) que constitui um ajuste nos dados. Vale ressaltar que os dados de concentração de aerossóis disponíveis pelo GOCART são correspondentes ao ano 2007.

4.2 Caso de estudo 01: 5, 6 e 7 de junho de 2017.

4.2.1 Resultados da simulação CONTROLE_1.

Após os testes de calibração, foram definidos os valores para os parâmetros que determinam as características específicas da microfísica para a região de interesse. Em relação aos aerossóis, como já foi mencionado anteriormente (Item 3.4.3), a distribuição das concentrações no nível da superfície foi parametrizado seguindo o formato de Gaussianas. Na Figura 4.4 é apresentada a distribuição das concentrações numéricas dos aerossóis em superfície para a RMSP para o caso de estudo 01. O maior valor de concentração de aerossóis totais utilizados na microfísica de nuvens (NCN + NG) foi de $1,60837+E10$ /kg. A região delimitada pela linha vermelha indica à área em superfície onde esse valor é utilizado pelo modelo. Essa área engloba a porção nordeste do município de SP e a região sudoeste de Guarulhos, e coincide com os dados de distribuição de aerossóis do GOCART e do EAC4 (ECMWF *Atmospheric Composition Reanalysis 4* (<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview>)). As concentrações dos aerossóis diminuem de forma exponencial com a altitude até alcançar valores próximos a zero em aproximadamente 8 km de altura e se mantendo dessa forma até o último nível vertical utilizado pelo modelo, que é localizado aproximadamente na altitude de 21 km. O valor máximo de concentração de NCN foram de $1.60831E+10$ /kg, enquanto o máximo de NG foi de 663324 /kg. Os NG representam menos de 1 % do total de aerossóis. Esses valores de concentração foram utilizados nos domínios onde a microfísica de nuvens de Thompson de 2 momentos é ativada, isto é, os domínios de 5 km e 1km de resolução espacial.

Figura 4.4 - Distribuição espacial da concentração numérica de aerossóis na superfície da RMSP utilizados na microfísica de nuvens pelo BRAMS-JULES no caso de estudo 01. Valores em /kg. A linha vermelha delimita a região onde foi considerado a maior concentração de aerossóis na superfície dentro do domínio de 1 km.



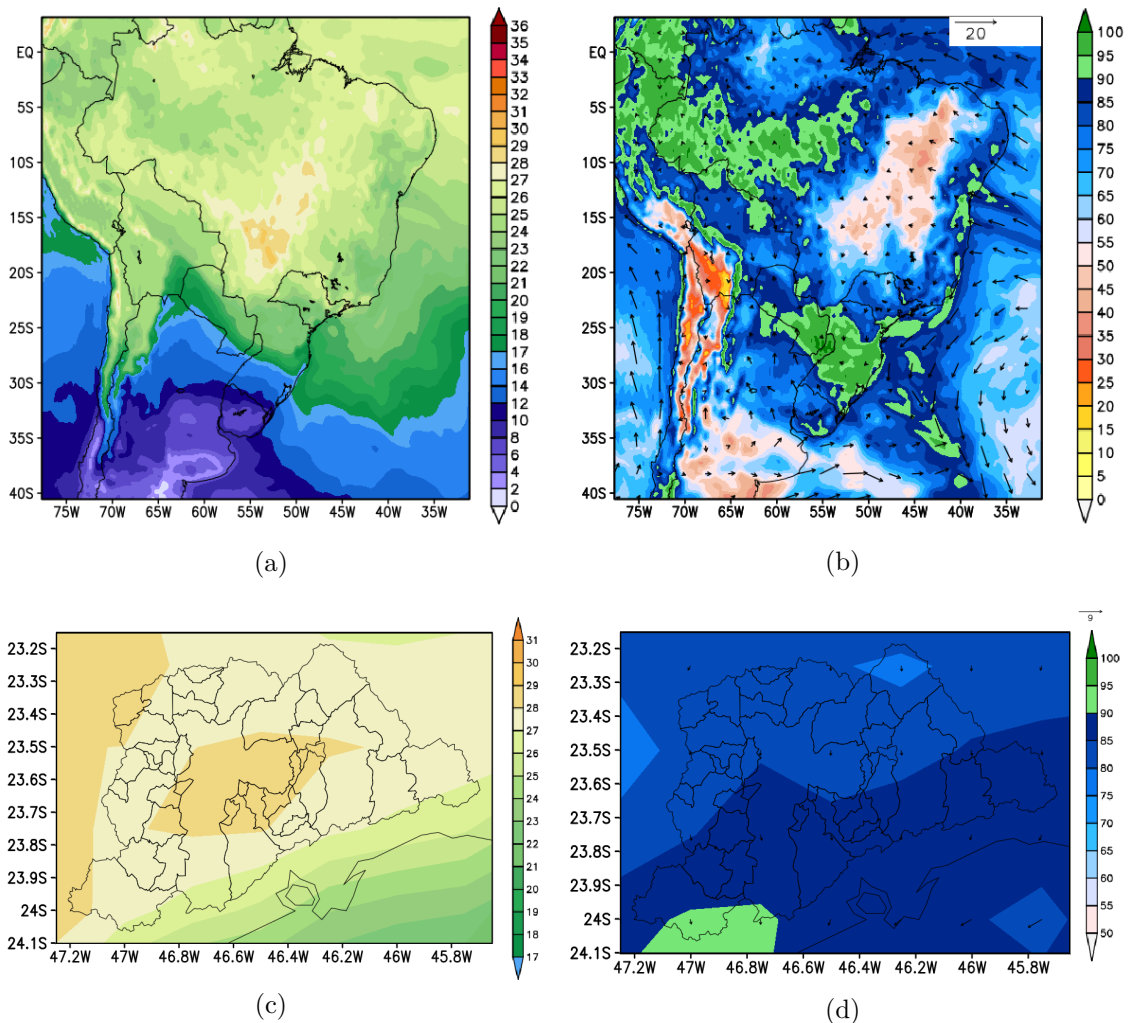
Fonte: Produção do autor.

Os campos prognósticos da atmosfera foram inicializados com os dados do ERA5, os quais também foram utilizados para as condições de contorno. Como visto nas cartas de superfície (Figura 3.9), para o mesmo dia e horário mostrado na Figura 4.5, a distribuição espacial dos valores de temperaturas indicam a presença de um sistema frontal estacionário sobre o norte do Estado Rio Grande do Sul, observando-se um alto gradiente de temperatura entre o centro desse estado e o sul do Estado de São Paulo. No momento da inicialização, os maiores valores de temperatura para todo o domínio encontram-se localizados na região Centro-Oeste do país (Figura 4.5(a)). Na Figura 4.5(c) é apresentada a temperatura do ERA5 para a RMSP, observa-se valores acima de 27 °C para toda a região, com máximo de 29 °C na área central.

A Figura 4.5(b) mostra a distribuição dos valores de umidade relativa e velocidade e direção do vento em superfície, para o horário em que a simulação é inicializada. São observados altos valores de umidade relativa, acima de 90 %, na região dianteira do sistema frontal e também em todo o litoral do Sudeste, em função da convergência dos ventos associados à circulação do sistema de alta pressão localizada sobre o

Atlântico, e que bloqueia o avanço do sistema frontal. Em geral, os menores valores de umidade relativa estão localizados sobre parte da região Nordeste do país e no Estado de Goiás. Na RMSP, os valores indicados pelo ERA5 de umidade relativa para o horário em análise ficaram acima de 80 % em toda a região, com máximos valores distribuídos na sua metade sul.

Figura 4.5 - Representação dos dados do ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 05/06/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície (°C) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície (°C) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.



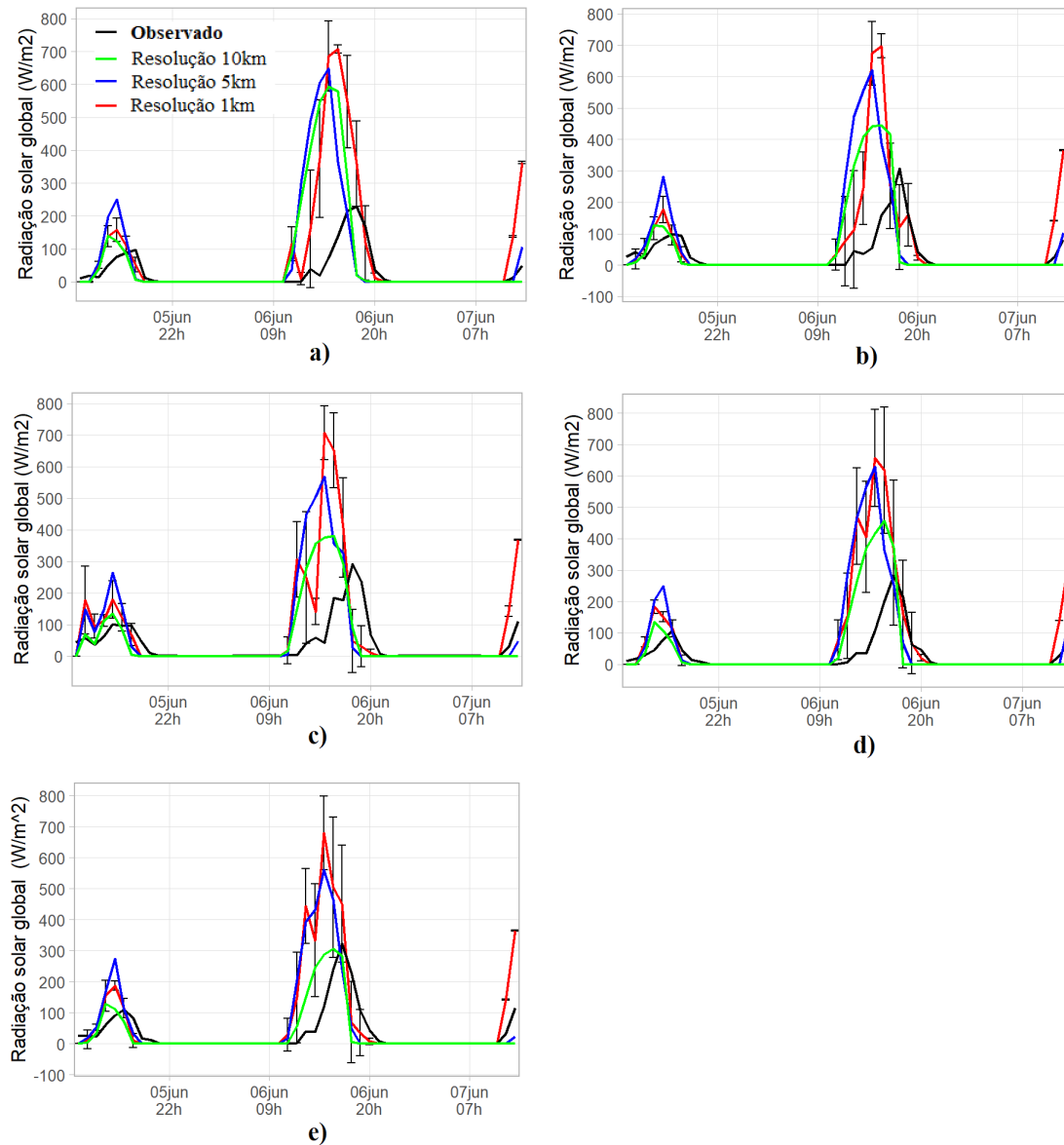
Fonte: Produção do autor.

A seguir é apresentada a análise dos resultados obtidos no conjunto de simulações CONTROLE para o caso de estudo 01. Os resultados mostrados são majoritariamente os obtidos para o domínio de 1 km, que foi o utilizado como referência para as comparações com os testes de sensibilidade como será visto no próximo Capítulo.

Neste primeiro caso, a simulação foi inicializada no momento em que começou o evento de precipitação intensa. As condições iniciais e de contorno transmitiram para o domínio de 10 km de resolução, que por sua vez transferiu para os outros domínios (5 km, e 1 km), as características da atmosfera que propiciaram uma melhor representação das nuvens e ao mesmo tempo uma melhora na previsão da radiação solar global em superfície no começo da rodada. A Figura 4.6 mostra a evolução da radiação solar em superfície durante o período de estudo para as subáreas nas quais foi dividida a RMSP (as áreas estão especificadas na Figura 3.8). Embora o modelo tenha superestimado a energia solar entre o final da manhã e o período da tarde do dia 5 de junho, este consegue capturar de forma satisfatória a diminuição da radiação solar global em superfície como registrado nas estações. O domínio de 5 km para o dia 5 apresentou valores de radiação solar maiores que os outros domínios e também em relação aos observados. No dia 6 de junho o ciclo diurno da radiação solar não foi estimado de forma correta pelo sistema de modelagem, uma superestimação da radiação solar global em superfície no horário que coincide com o final do evento severo de precipitação.

Para o dia 6 de Junho, nos três domínios e em todas as subáreas, o momento em que ocorre o aumento da radiação se dá antes do observado. À semelhança do dia anterior, o domínio de 10 km apresentou o melhor resultado apesar da importante superestimação.

Figura 4.6 - Representação gráfica dos valores médios horários da radiação solar global observados e simulados em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos no cálculo de diferentes índices estatísticos para todas as variáveis em análises e todas as subáreas ao se comparar dados observados e simulados no domínio de 1km de resolução espacial. No caso da radiação solar global os valores de erro médio indicam em todas as subáreas uma superestimação, não ultrapassando o valor de 56 W/m². O índice REQM ficou entre 128 W/m² (melhor valor, encontrado para a subárea 5) e 151 W/m² (pior valor, encontrado para a subárea 1), influenciado principalmente pelo segundo pico de radiação no final do dia 06 de junho, quando o modelo não conseguiu prever corretamente a energia solar na superfície. Os valores do coeficiente de concordância são bastante satisfatórios, ficando entre 0,47 e 0,64.

Tabela 4.2 - Valores dos diferentes índices estatísticos adotados para avaliar o desempenho do modelo para as variáveis meteorológicas em todas as subáreas dentro da RMSP e para o caso 01 de estudo. São comparados os dados observados e os simulados com o domínio de 1 km de resolução, no período de 48 horas.

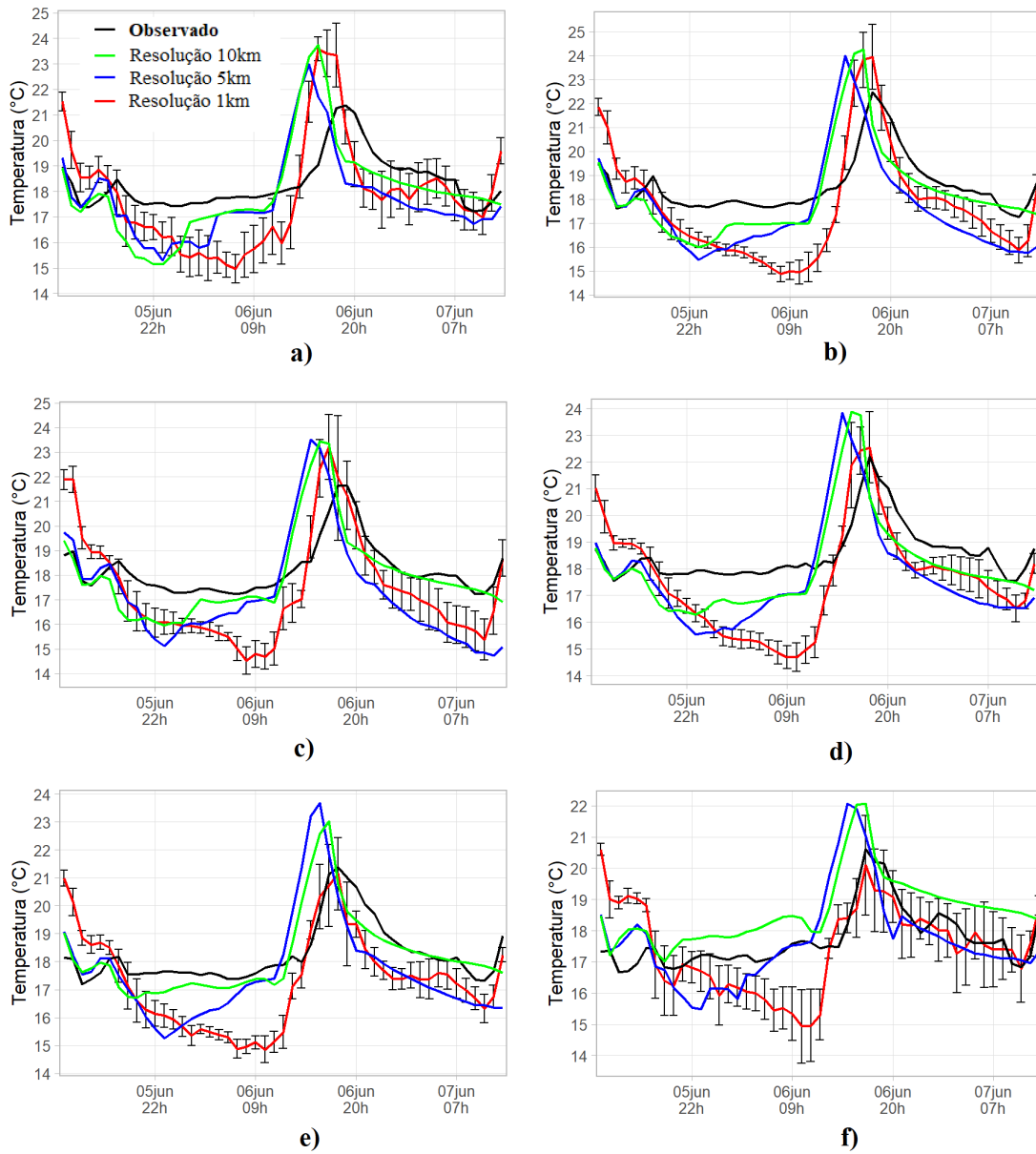
Sub- área\Variá vel	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	55,80	150,85	0,54	-0,50	1,69	0,68	0,35	4,50	0,61	-0,15	1,23	0,50
2	37,09	133,99	0,52	-0,85	1,70	0,75	-1,01	4,16	0,79	-0,20	0,55	0,47
3	40,66	147,71	0,47	-0,78	1,64	0,74	-1,87	4,76	0,63	0,002	0,51	0,36
4	51,59	139,02	0,57	-0,97	1,71	0,68	1,81	3,55	0,73	0,23	0,58	0,50
5	40,66	128,19	0,64	-0,95	1,56	0,67	3,61	5,49	0,51	-0,78	0,98	0,45
6	-	-	-	-0,28	1,24	0,67	0,33	3,06	0,47	-0,21	1,21	0,26

Em relação à temperatura, o modelo subestimou em todas as áreas, no entanto, o valor modular de EM manteve-se menor que 1 °C em todos casos. As linhas correspondentes às simulações que utilizam 1 km de resolução espacial mostram uma superestimativa de aproximadamente +3 °C no começo da integração, diferença que tende a diminuir inicialmente e posteriormente passa a subestimar no período entre o final da noite do dia 05 e a manhã do dia 06 de junho, chegando a uma diferença de aproximadamente -3 °C (ver Figura 4.7). Posteriormente, na manhã do dia 6, os valores de temperatura média começam a aumentar para todos os domínios, alcançando os máximos na tarde desse mesmo dia. Essas características descritas para a variável temperatura são observadas em todas as subáreas. Durante o período de precipitação intensa, a temperatura média observada nas estações ficou entre os 17 °C e os 19 °C, com exceção da área 6 que registrou valores abaixo de 17 °C durante algumas horas no começo da simulação.

Nas subáreas mais ao sul (5 e 6), o máximo de temperatura simulado no domínio de 1 km não ultrapassou o observado (Figura 4.7e e 4.7f). Também se observa um ligeiro adiantamento do momento em que se registra o máximo de temperatura, principalmente para os domínios de 10 km e 5 km de resolução espacial. Nas últimas horas da simulação, os valores previstos pelo sistema de modelagem apresentaram a melhor acurácia.

Os valores de REQM foram relativamente baixos (Tabela 4.2), sendo pior para a área 4 (1,71 °C) e melhor para a subárea 6 (1,24 °C). Nesta última, que é menos urbanizada, a temperatura média observada foi menor que nas outras subáreas, contribuindo com os resultados para o índice REQM. Os valores dos índices de correlação foram altos, entre 0,67 e 0,75, demonstrando que o modelo capturou a tendência da variável no tempo durante o período analisado de 48 horas.

Figura 4.7 - Representação gráfica dos valores médios horários para a variável temperatura observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



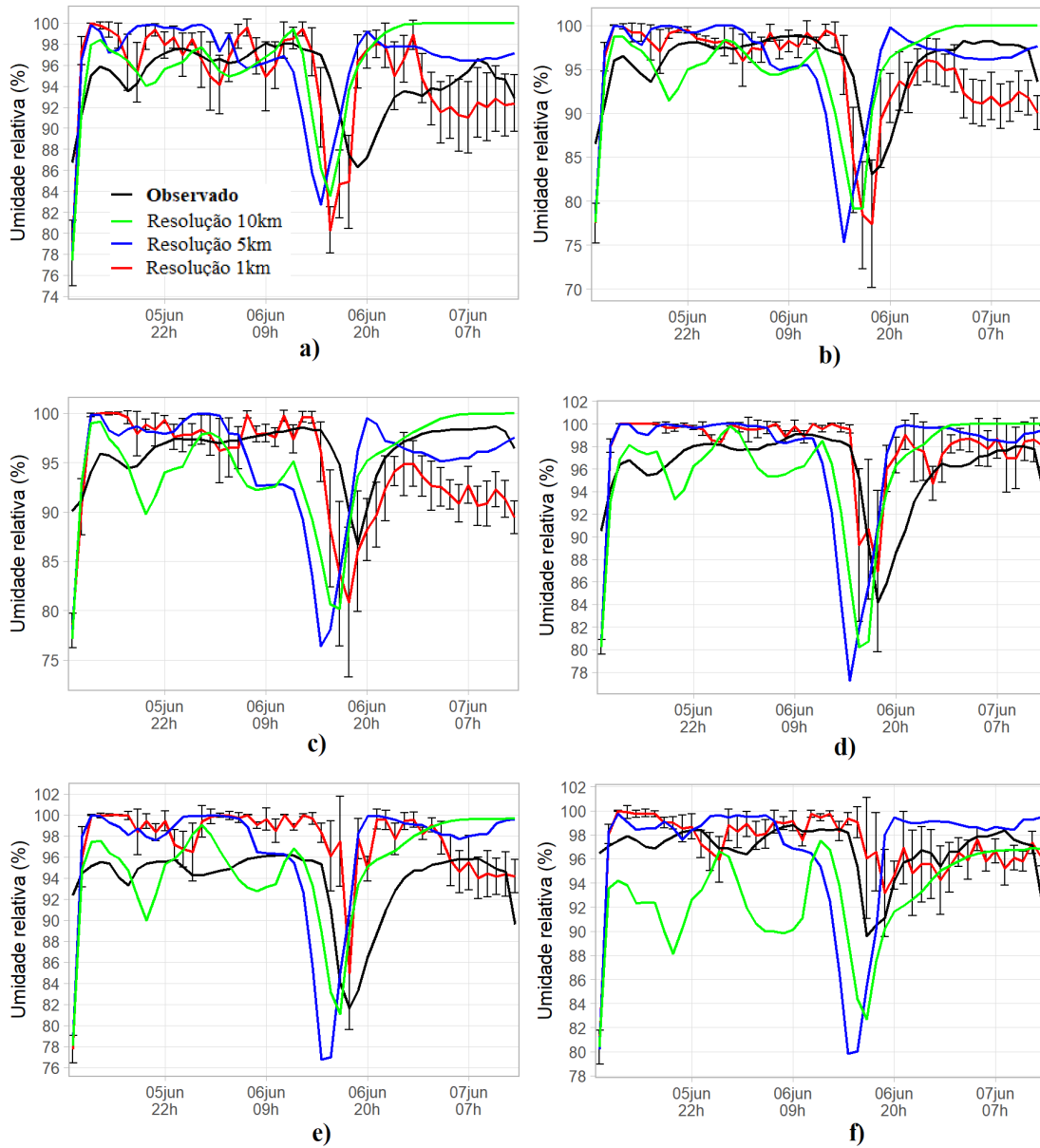
Fonte: Produção do autor.

Ao analisar a umidade relativa se observa que o modelo apresentou ótimo desempenho em prever os altos valores para esta variável durante o período em que aconteceu o evento extremo, isso principalmente para o domínio de 1 km de resolução (Figura 4.8). Nas primeiras horas, as maiores diferenças entre observação e simulação foram controladas pela influência das condições iniciais, pois esta variável é lida diretamente da condição inicial, contrário às mostradas anteriormente que são calculadas pelo próprio modelo desde o começo. Isso se aplica também à temperatura, pois aqui está sendo analisada a temperatura obtida pelo JULES e não a do BRAMS que também é lida de forma direta das condições iniciais.

O sistema de modelagem representou algumas dificuldades com os mínimos de umidade relativa, especialmente os observados no final da tarde do dia 6 de junho. Em todas as subáreas, os valores mínimos nesse intervalo de tempo foram previstos antes do observado pelos domínios que utilizam 10 km e 5 km de resolução espacial e em todos os casos houve subestimativa da umidade relativa. No domínio de 5 km, é observada a maior subestimativa. Na simulação para o domínio de 1 km de resolução, a mínima umidade relativa é alcançada antes do observado nas subáreas 1, 2 e 3, mas nas outras coincide com o observado ou ocorre depois. No entanto, em quase todas as subáreas e domínios, a diminuição da umidade relativa na tarde do dia 6 começa antes do observado, e isso está relacionado com a antecipação da tendência de aumento da radiação solar e conseqüentemente da temperatura que leva está relacionada com essa diminuição da umidade.

Na Tabela 4.2, os valores dos índices estatísticos mostram os bons resultados obtidos para esta variável. Foram obtidos valores baixos de EM e REQM em todas as áreas. No geral, a UR foi subestimada nas subáreas 2 e 3 e superestimada nas outras. O pior valor de REQM foi obtido para a subárea 5, e foi de 5,49 %, mesma subárea em que foi observada a maior superestimativa dos valores previstos em relação com os observados (3,61%). No geral o índice de concordância também mostrou resultados bons, com máximo de 0,79 obtido para a área 2, reflexo também de um maior número de observações naquela área, e que favorece comparação para esta variável, e mínimo de 0,47 na subárea 6 onde existem menos estações em superfície.

Figura 4.8 - Representação gráfica dos valores médios horários da umidade relativa observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



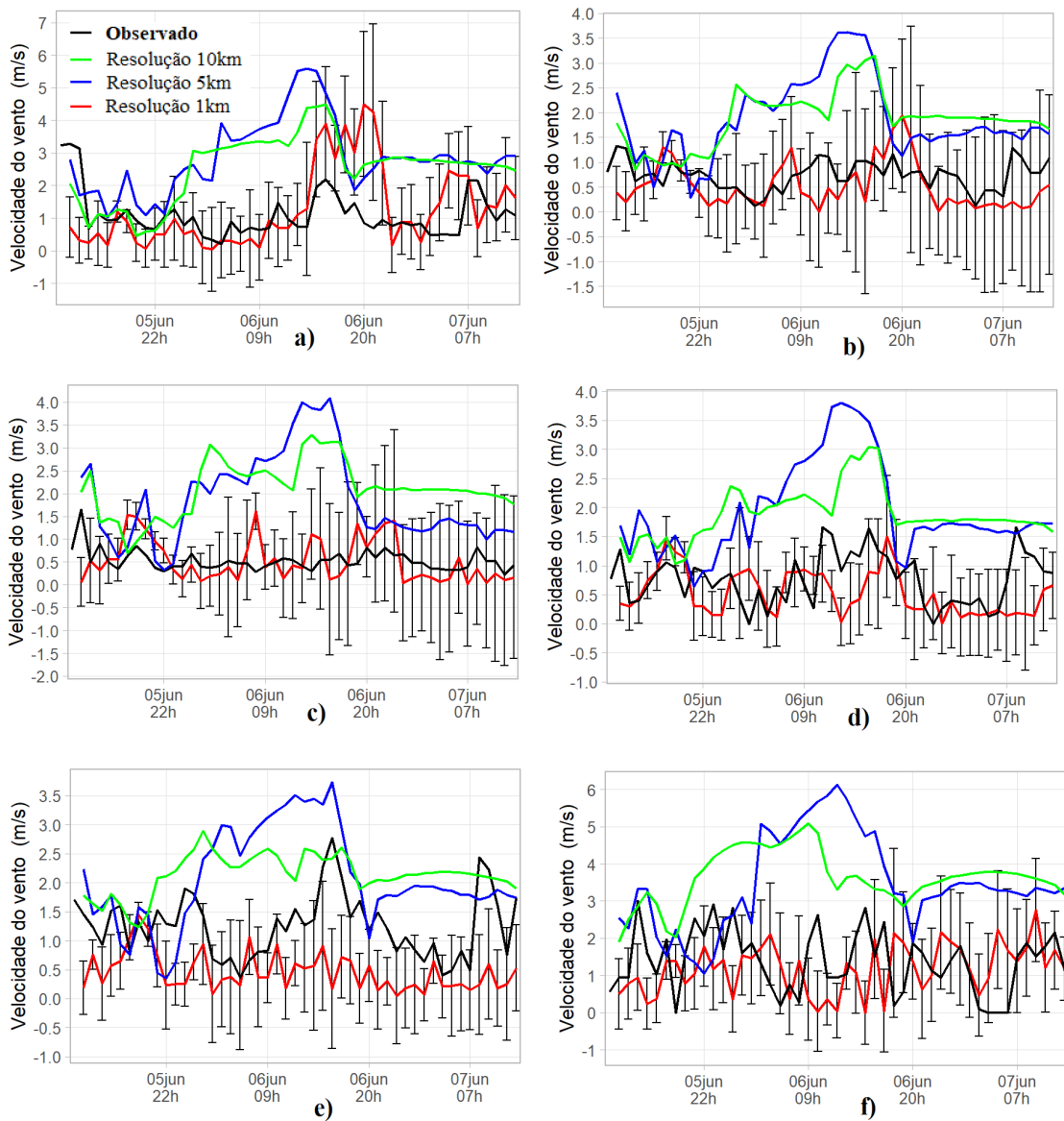
Fonte: Produção do autor.

Outrossim, a velocidade do vento pelo modelo foi bem representada pelo JULES, principalmente no domínio de 1 km de resolução espacial. Notável o efeito da alta resolução na simulação para obter melhores resultados para o vento, uma variável altamente sensível às características da superfície urbana (Figura 4.9). As médias horárias em todas as subáreas para os domínios 10 km e 5 km foram acima do observado em quase todo o período, com destaque para o intervalo entre a noite do dia 5 e a noite do dia 6, quando altos valores de velocidade do vento foram previstos pelo sistema, registrando os máximos absolutos. Os valores previstos de velocidade do vento pelo domínio 1km, ficaram, na maioria das horas, muito próximos do observado. Foram poucas as ocasiões em que os valores observados não estiveram dentro do limite estabelecido pelo desvio padrão para a simulação de maior resolução espacial, representado pelas linhas negras verticais.

Durante o período do evento extremo de precipitação, os valores de velocidade do vento registrados nas estações não foram elevados, ficaram abaixo de 2 m/s em todas as subáreas, com exceção da área 6, onde na segunda hora de integração chegou a 3 m/s, situação que pode estar associada à baixa presença de mancha urbana na subárea. Não se observou tendências de altas ou de baixas velocidades durante todo o período da simulação, máximos e mínimos relativos são identificados no decorrer das horas analisadas. A mesma situação é representada pelas simulações.

Os valores de EM foram próximos a zero em todos os casos para o domínio de 1 km de resolução espacial, sendo que na área 3 foi praticamente zerado, ver Tabela 4.2. Considerando todo o período, esse índice indica uma superestimativa para as subáreas 3 e 4, enquanto nas outras se observa uma subestimativa do vento. Os valores de REQM também podem ser considerados satisfatórios, e estiveram entre 0,51 m/s (melhor resultado para a subárea 3) e 1,23 m/s o pior resultado na subárea 1, principalmente pelo grau maior de superestimativa durante a tarde e noite do dia 6 de junho, que propiciou esse valor elevado para o índice. O coeficiente de concordância também se mostrou satisfatório para todas as subáreas apesar de algumas discordâncias na tendência prevista no tempo para a variável, foram obtidos valores entre 0,36 (na subárea 3) e 0,50 (nas subáreas 1 e 4).

Figura 4.9 - Representação gráfica dos valores médios horários da velocidade do vento observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



Fonte: Produção do autor.

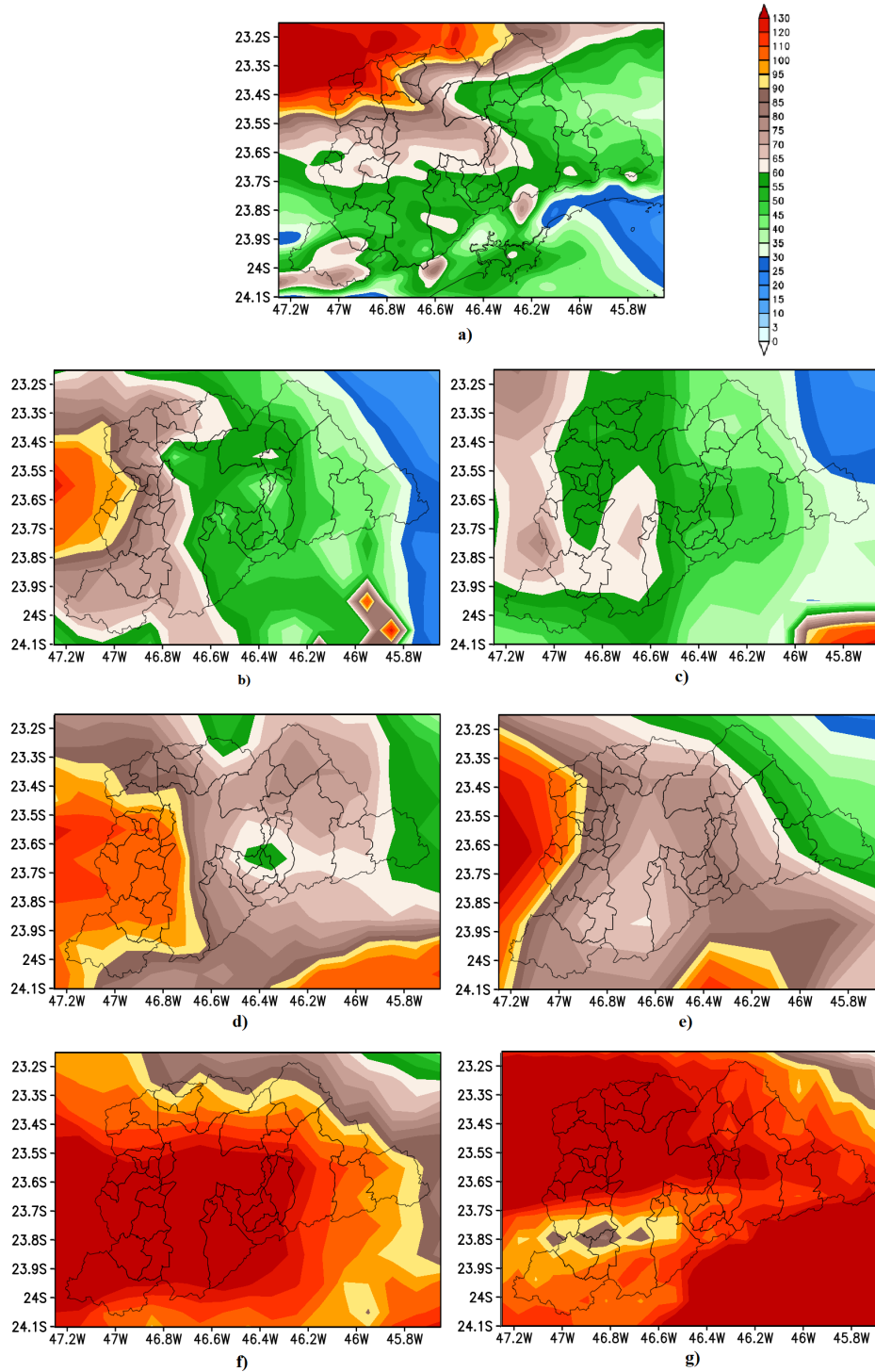
Precipitação

A avaliação da precipitação foi feita a partir da comparação com os produtos derivados de satélites e com os dados observados nas estações em superfície. Na Figura 4.10 ilustra-se a distribuição espacial da precipitação total acumulada no período entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 15:00 UTC do dia 06/06/2017, que coincide com o evento extremo de precipitação para o caso 01 de estudo. A precipitação para este caso esteve associada à chegada de um sistema frontal à região, cuja extensão foi suficiente para que fossem registrados acumulados de chuva nos 39 municípios da RMSP, ver Item 3.3.1.

Em geral, nas representações da Figura 4.10, a precipitação acumulada alcança o máximo registrado na porção oeste da RMSP. Apenas nos produtos CMRPH (Figura 4.10g) e GSMaP (Figura 4.10f) que são observados valores máximos também sobre o centro e um pouco ao leste da região. Nas análises das imagens de satélite (Figura 3.11), radar (Figura 3.12) e das descargas elétricas (Figura 3.13) percebe-se que realmente o maior desenvolvimento da tempestade foi na porção oeste da RMSP, em alguns dos municípios das sub-regiões Oeste e Sudoeste foram onde se observou os maiores valores de acumulados de chuva nas estações em superfície.

A precipitação prevista pelo BRAMS-JULES (Figura 4.10a) teve configuração espacial e quantitativa semelhante principalmente à registrada pelos produtos MERGE (Figura 4.10b), mas também ao GSMaP calibrado (Figura 4.10c), mesmo que neste último os valores estimados de precipitação máxima foram menores. Uma área bem definida de precipitação acima de 90 mm foi prevista pelo sistema de modelagem sobre parte da sub-região Oeste e extremo norte da sub-região Norte. Valores acima de 130 mm foram obtidos para a região de Jundiaí, Itupeva, Cabreúva, Itu, Salto, Indaiatuba e São Roque, todos municípios a noroeste da RMSP. No caso dos produtos derivados do MERGE, GPM_3IMERGHH (Figura 10d) e TRMM_3B42RT (Figura 10e), os máximos de chuva foram localizados no Oeste, mas com picos também no sul. Nas 3 estimativas de precipitação mencionadas anteriormente, foram obtidos valores máximos acima de 100 mm, isso considerando a área que enquadra a RMSP e que não coincide em extensão com a totalidade do domínio de 1km do conjunto de simulação CONTROLE_1. Para a estimativa dada pelo GSMaP calibrado, os máximos ficam também a oeste com ramificações para noroeste, mas com valores que não ultrapassam os 90 mm.

Figura 4.10 - Representação da precipitação total acumulada para a RMSD e áreas próximas no período entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 15 UTC do dia 06/06/2017 referente ao caso 01. a) Simulação de 1 km de resolução espacial para o CONTROLE_1, b) MERGE, c) GSMaP-C, d) GPM_3IMERGHH, e) TRMM_3B42RT, f) GSMaP, g) CMORPH.



Fonte: Produção do autor.

Para os produtos GSMaP não calibrados e CMORPH, os valores estimados de precipitação acumulada estiveram acima de 130 mm em parte considerável da RMSP. Essas estimativas, que são semelhantes, podem ser consideradas como superestimadas uma vez que o GSMaP calibrado, a partir dos dados das estações, mostra valores menores em relação ao não calibrado.

Excluindo os resultados dos produtos CMORPH e o GSMaP não calibrado, avalia-se pela precipitação estimada pelos demais produtos derivados de satélite e prevista pelo modelo que a máxima chuva ocorreu na porção oeste da RMSP e a menor na porção leste. Essa configuração tem a ver com as características do sistema responsável pela chuva, que avançou em direção nordeste afetando toda a região e chegando até o limite leste desta. As descargas elétricas registradas também tiveram essa configuração, quando se analisou a densidade dos registros observou-se um maior número de descargas na porção oeste. Também foram observadas algumas descargas ao norte e também sobre o Atlântico ao sul, coincidindo com máximos relativos de precipitação em todos os casos analisados.

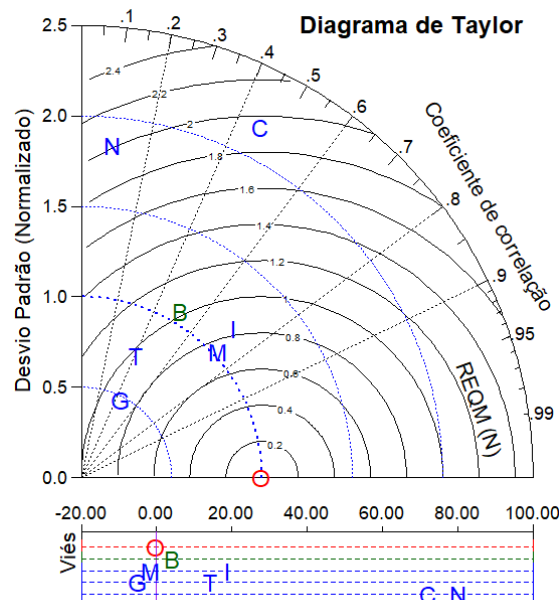
Na Figura 4.11 é apresentado o diagrama de Taylor com a representação dos diferentes índices estatísticos utilizados nesta pesquisa, calculados para todos os produtos de precipitação e para a previsão do modelo dessa variável, considerando os dados para 228 pontos em superfície onde também foram registrados dados observados de precipitação. Na Tabela 4.3 são detalhados os valores dos índices estatísticos sem normalização. Esses valores são associados aos produtos de precipitação derivados de satélites e à previsão para esta variável feita pelo BRAMS-JULES (ao comparar com os dados observados), assim como para os dados observados nas estações.

A partir do erro médio, pode-se concluir que no geral o MERGE e o GSMaP-C subestimaram ligeiramente a chuva acumulada, enquanto os outros produtos e o sistema de modelagem superestimaram. O valor do EM para o BRAMS-JULES é relativamente baixo (4,2 mm) enquanto para os produtos GSMaP e CMORPH os valores foram 80,2 mm e 72,2 mm respectivamente. Valores muito altos se considerarmos que os maiores registros nos pluviômetros foram de aproximadamente 100 mm. Essa situação confirma a afirmação feita anteriormente sobre a superestimativa desses 2 produtos.

O índice REQM teve valores entre 9,9 mm (o mais baixo, associado ao produto MERGE) e 84,5 mm (o mais alto, associado ao GSMaP não calibrado). Os dados previstos pelo BRAMS-JULES ficaram com um valor de REQM de 14 mm, muito próximo dos dois produtos com melhor desempenho. Os valores do índice de concordância mostraram melhores resultados para o produto MERGE e GPM_3IMERGHH, com valores de 0,74 e 0,71, respectivamente, seguidos pelo BRAMS-JULES com 0,51. Em geral este índice mostrou bons resultados para todos os produtos (valores acima de 0,4), com exceção do GSMaP não calibrado que ficou em 0,09, valor muito baixo.

Em relação ao desvio padrão que dá uma estimativa da dispersão dos dados, os valores previstos pelo modelo, pelo MERGE e pelo GPM_3IMERGHH apresentaram valores muito próximos neste índice em relação com os dados observados, sendo essa a condição desejada.

Figura 4.11 - Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação, caso de estudo 01. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_1, M->MERGE, G-> GSMaP-C, N->GSMaP não calibrado, I-> GPM_3IMERGHH, T-> TRMM_3B42RT e C-> CMORPH.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 - Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados aos produtos de precipitação derivados de satélites e à previsão para esta variável feita pelo BRAMS-JULES (ao comparar com os dados observados), assim como para os dados observados nas estações. Caso de estudo 01, junho de 2017.

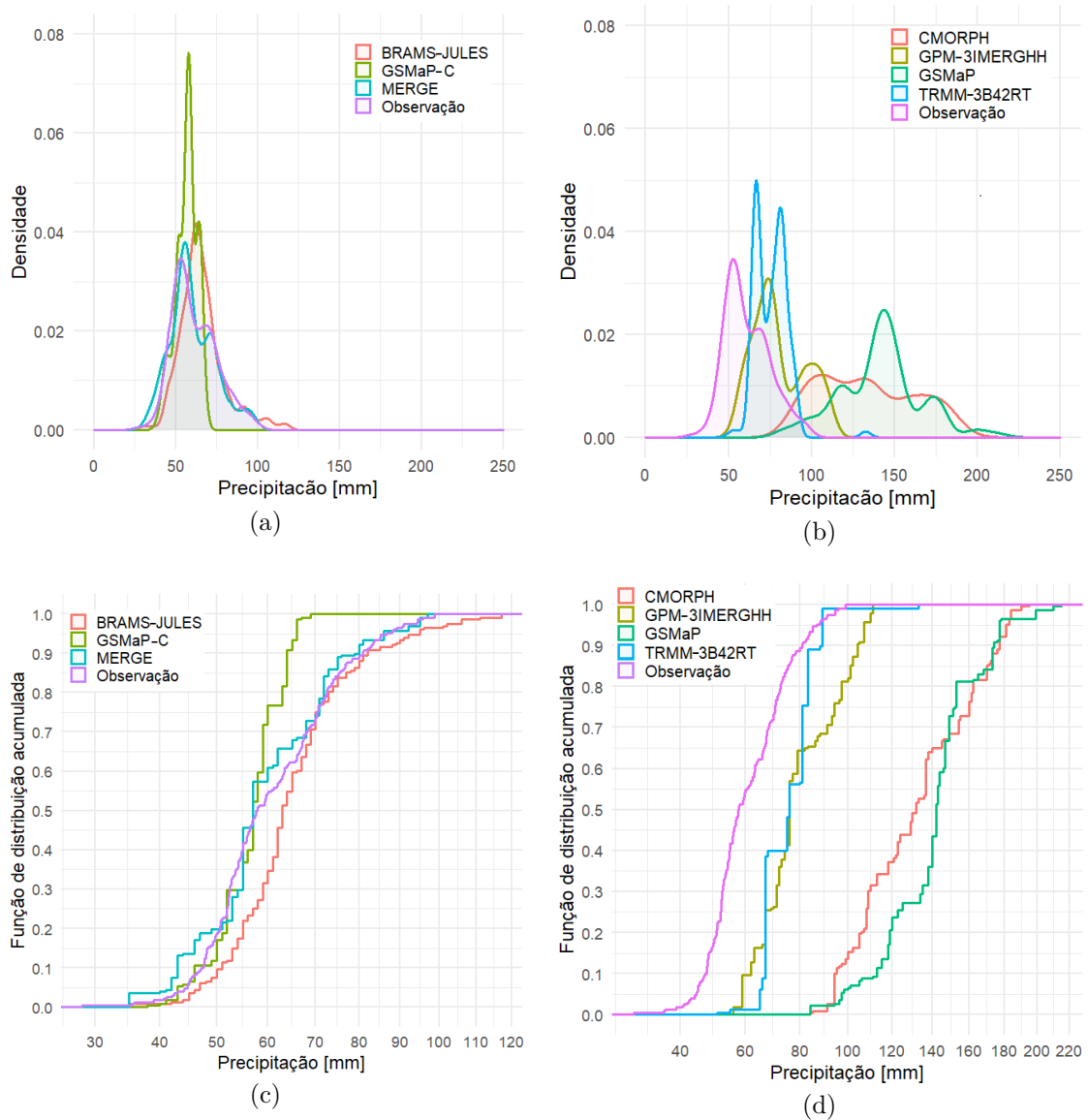
Dados\Índices	DP	REQM	CC	EM(Viés)
Estações (O)	13,3	0	1	0
BRAMS-JULES (B)	13,8	14,0	0,51	4,2
MERGE (M)	13,6	9,9	0,74	-1,3
GSMaP-C (G)	6,3	12,9	0,45	-5
GSMaP (N)	24,5	84,5	0,09	80,2
GPM_3IMERGHH (I)	15,7	22,0	0,71	18,9
TRMM_3B42RT (T)	9,8	19,2	0,41	14,2
CMORPH (C)	28,9	76,7	0,46	72,2

A análise dos gráficos de densidade (Figura 4.12a e 4.12b) mostra que o intervalo de precipitação registrado em maior número de estações em superfície é o de 50 a 55 mm, foram 53 estações no total. Os valores de precipitação total observados variaram entre 25 e 100 mm em todas as estações consideradas dentro da RMSP. A distribuição mais próxima da observada foi a obtida com os dados derivados do MERGE, que também apresentou o maior número de registros no intervalo entre 50 mm e 55 mm, com 59 pontos em total.

Para os produtos com pior desempenho, segundo a análise anterior, obteve-se uma distribuição que mostra o porquê do alto valor de EM. Tanto para o CMORPH como para o GSMaP não calibrado (Figura 4.12b), os valores registrados nos pontos onde se encontram as estações foi sempre superior a 80 mm, com boa parte deles registrando valores acima de 100 mm, que foi o máximo observado. No caso do modelo, o intervalo com maior número de registros foi ligeiramente superior ao observado, de 60 a 65 mm com um total de 57 pontos mostrando estes valores. No geral, a distribuição para o modelo não foi muito distante da observada, com a maioria dos registros de precipitação total acumulada entre 40 e 80 mm, parecida à obtida com os dados observados. A distribuição mostra também o pico acentuado de densidade para o produto GSMaP calibrado (Figura 4.12a) em valores próximos da mediana dos observados. Essa concentração de valores ao redor de um valor médio, e sem muita dispersão, está em concordância com baixo valor de desvio padrão encontrado para este produto. Fica visível também no gráfico de densidade a superestimativa dos produtos GPM_3IMERGHH e TRMM_3B42RT (Figura 4.12b), mesmo que em menor medida quando comparados com o GSMaP não calibrado e o CMORPH. As curvas para esses produtos estão deslocadas para direita em comparação com a associada aos dados observados.

Nos gráficos de distribuição acumulada (Figura 4.12c e 4.12d) observa-se que nos produtos GSMaP-C (Figura 4.12c) não teve registros de precipitação, nos pontos analisados, acima de 70 mm, enquanto os dados observados tiveram 25 % dos valores nessa faixa, o que explica em parte a subestimativa geral observada para este produto. Outrossim, os valores observados tiveram aproximadamente 55 % das estações registrando acumulados no intervalo entre 50 mm e 70 mm, os dados do produto MERGE foram os que mais se aproximaram para este intervalo, com aproximadamente 55 % dos valores também nesse intervalo, o que explica o melhor desempenho geral deste produto na estimativa de precipitação. Os dados previstos pelo BRAMS-JULES tiveram 60 % dos valores no intervalo de precipitação entre 50 mm e 70 mm, já o produto TRMM_3B42RT e GPM_3IMERGHH tiveram 40 % e 25 % respectivamente. CMORPH e GSMaP não calibrado não estimaram valores nesse intervalo para os pontos analisados em superfície.

Figura 4.12 - Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados derivados de produtos de satélite e os previstos pelo BRAMS-JULES, especificamente para a simulação no domínio de 1 km de resolução espacial, caso de estudo 01. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de melhor desempenho), (b) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de pior desempenho), (c) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de melhor desempenho), (d) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de pior desempenho).



Fonte: Produção do autor.

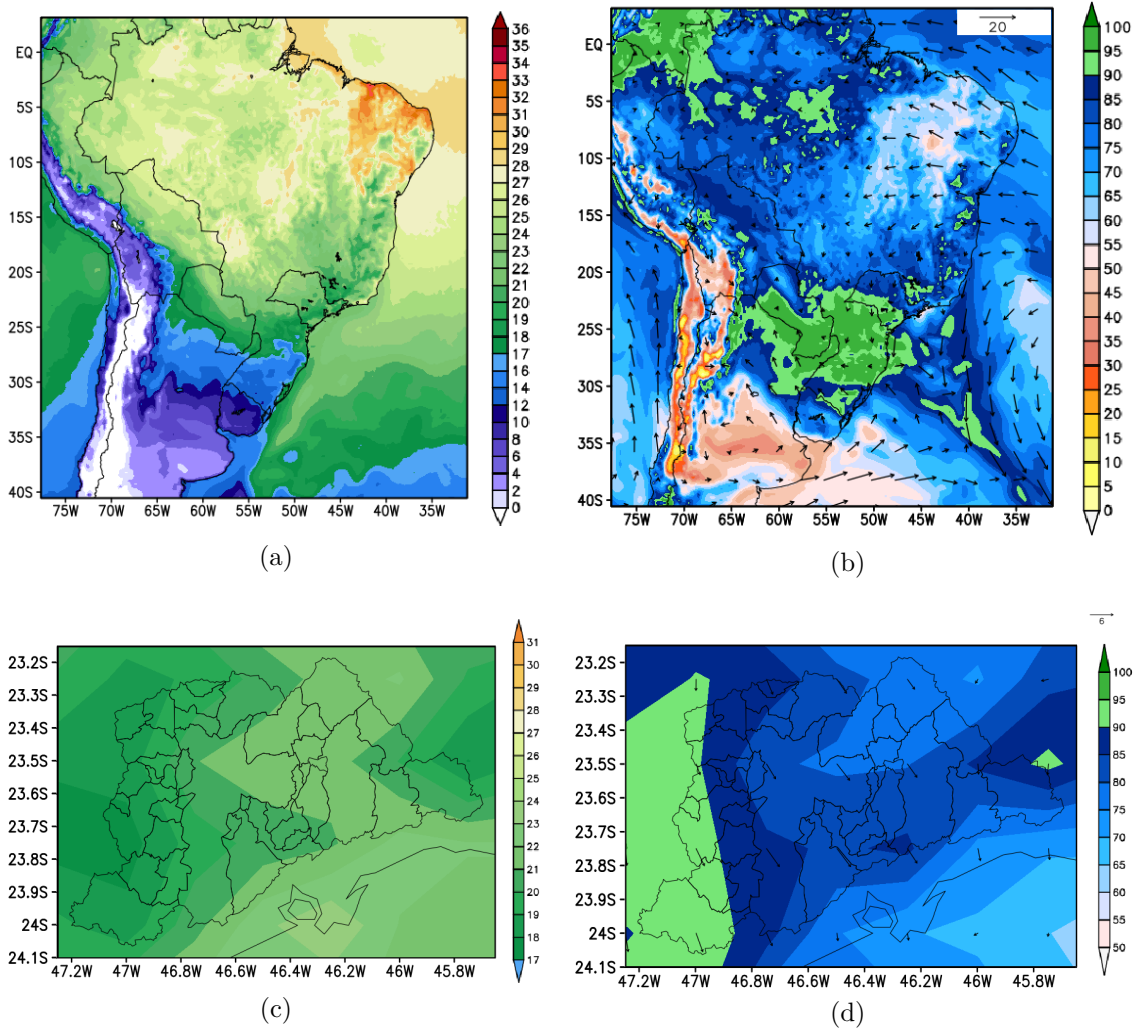
O desempenho do BRAMS-JULES na representação da precipitação foi semelhante com a do produto GSMaP-C, ligeiramente superior aos produtos GPM_3IMERGHH e TRMM_3B42RT e muito superior aos produtos GSMaP não calibrado e CMORPH. Esses resultados mostram a viabilidade da utilização da simulação de 1km de resolução espacial do conjunto de simulações CONTROLE_1 feita com o BRAMS-ULES, no estudo da sensibilidade para este caso de estudo. Depois de ver os resultados da comparação, vale também ressaltar que o MERGE apresentou a estimativa mais realista da precipitação mostrando a relevância deste produto.

4.2.2 Estudo do impacto das mudanças nas condições iniciais e de contorno nos resultados das simulações para o caso de estudo 01.

Nesta Seção são analisados os resultados dos conjuntos de simulações realizados (Tabela 3.7) com o BRAMS-JULES para estudar o impacto das condições iniciais e de contorno na previsão do evento severo de precipitação. Além dos CS inicializados com dados do ERA5, considerando momentos diferentes do CONTROLE_1, também é analisado o CS inicializado com dados do GFS. Nesse último caso, os dados do GFS também mostram no momento inicial uma configuração de temperatura para o domínio de 1km (Figura 4.13(a)) que indica o avanço de um sistema frontal sobre o Sul do Brasil, com uma região de alto gradiente sobre o norte de Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A região com temperaturas abaixo de 17 °C está mais ao norte do que o observado nos dados do ERA5, situação que determinou características diferentes de temperatura sobre a RMSP, como pode ser visto na figura 13c. Na RMSP, os dados de temperatura do ERA5 ficaram acima de 26 °C, enquanto nos dados do GFS ficaram abaixo de 25 °C, no momento inicial. Em geral, a temperatura para o Estado de São Paulo calculada pelo modelo GFS ficou abaixo da calculada pelo ERA5.

Em relação a umidade relativa acontece algo semelhante. Valores acima de 90 % foram previstos pelo GFS para boa parte da região Sul do país e o sul do Estado de São Paulo (Figura 4.13(b)), enquanto no ERA5 esses valores só foram observados no extremo sul do Estado de São Paulo (Figura 4.5(b)). Sobre a RMSP, com o GFS como condição inicial, se observa uma faixa a oeste com valores acima de 90 % (Figura 4.13(d)), e no restante a UR variando entre 75 % e 90 %, essa configuração também é diferente do observado com o ERA5.

Figura 4.13 - Representação dos dados do GFS (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs>), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 05/06/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície ($^{\circ}\text{C}$) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície ($^{\circ}\text{C}$) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes índices estatísticos calculados considerando o domínio de 1km de resolução espacial das simulações apresentadas na Tabela 3.7, isso para o caso 01 de estudo e considerando também a simulação inicializada com dados do GFS, diferente do CONTROLE_1, inicializada com dados do ERA5. Foram consideradas as 6 subáreas nas quais a RMSP foi dividida para a análises estatística e validação. No total, foram 4 conjuntos de simulações dos quais se analisou o domínio de 1 km de resolução espacial. Os períodos de integração total do modelo para cada CS estão descritos na Tabela 3.7. No entanto, para esta análise se considerou o mesmo intervalo de tempo empregado na simulação CONTROLE_1, entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 12:00 UTC do dia 07/06/2017. Para a variável precipitação, a análise considera unicamente o período de chuva extrema, 27 horas em total.

Para a radiação solar global observa-se, nos 4 casos analisados, que durante o final da manhã e a tarde do dia 5 o modelo não conseguiu capturar a diminuição acentuada de radiação pela presença do sistema que provocou a chuva. Essa situação foi comprovada ao analisar a variável precipitação, que será detalhada proximamente, nas 4 simulações a chuva começou horas depois do observado, causando esse pico na radiação na tarde do dia 5 de junho de 2017. Na Figura 4.14 observa-se que essa situação aconteceu em todas as subáreas e os valores máximos foram semelhantes, aproximadamente 700 W/m^2 para todas as simulações com exceção da inicializada com dados do GFS (linha roxa), que mostra uma leve diminuída no pico máximo no período da tarde do dia 5. O CONTROEL_1, como já foi analisado anteriormente, conseguiu prever essa queda na radiação global nesse período.

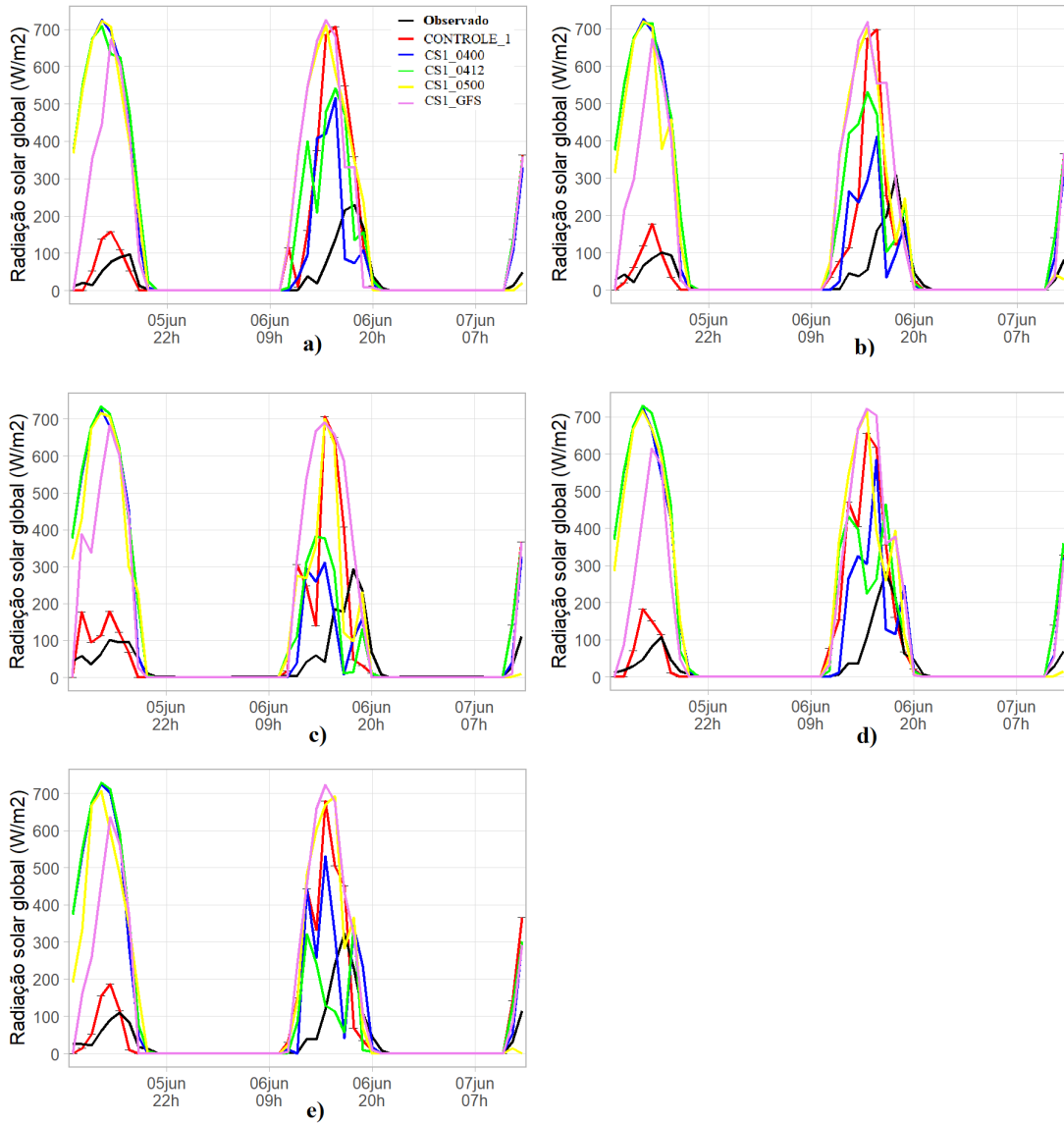
No final da manhã e tarde do dia 6, dia onde na manhã ainda se registraram valores de precipitação em todas as subáreas, todos os casos analisados superestimaram os valores de radiação, indicando uma antecedência no decaimento da precipitação pelo modelo. Vale destacar que apesar da superestimação, as simulações pertencentes aos CS1_0400 e CS1_0412, de maior antecedência na inicialização da integração, mostram valores máximos menores nesse período em todas as subáreas. Isso indica que nesses casos ainda existia presença de nuvens que provocaram essa diminuição, mesmo que em menor medida quando comparado ao observado.

Os valores de EM indicam superestimação para a variável radiação em valores sempre acima de 80 W/m^2 . A simulação associada ao CS_0500 teve os piores valores para o índice REQM, no entanto, para todas as subáreas e casos esse índice teve valores altos, sempre acima de 200 W/m^2 . O coeficiente de correlação alcançou valores que em média rondam 0,3, com exceção da simulação associada ao CS1_GFS que alcançou valores acima de 0,40 em 4 das subáreas, e especificamente na subárea 5 esse índice foi de 0,51, o maior entre todas as subáreas e simulações analisadas.

Tabela 4.4 - Índices estatísticos calculados considerando as simulações com domínio de 1 km, dos CS1_0400, CS1_0412, CS1_0500 e CS1_GFS, correspondentes ao caso de estudo 01. Foram consideradas para o cálculo dos índices os resultados obtidos entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e 12:00 UTC do dia 07/06/2017. Os números destacados em vermelho e azul indicam o melhor e pior valor do índice REQM respectivamente para cada variável e cada conjunto de simulação.

Domínio de 1km correspondente ao CS1_0400												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	103,11	232,53	0,27	-1,69	3,23	0,28	-0,84	6,27	0,32	0,97	1,51	0,47
2	92,12	219,13	0,31	-2,39	4,17	0,26	-3,54	9,76	0,23	0,02	0,71	0,43
3	82,02	213,80	0,32	-2,30	4,13	0,27	-5,07	9,85	0,24	0,37	0,80	0,39
4	102,65	223,06	0,33	-2,28	3,73	0,24	0,16	7,42	0,24	0,06	0,87	0,40
5	96,18	221,87	0,36	-2,11	3,88	0,23	1,22	9,68	0,18	-0,42	1,05	0,36
6	-	-	-	-1,36	2,96	0,25	-2,33	7,44	0,20	1,10	2,12	0,32
Domínio de 1km correspondente ao CS1_0412												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	123,77	238,88	0,33	-1,05	2,52	0,32	-2,51	7,10	0,26	1,13	1,65	0,36
2	118,74	240,61	0,30	-1,46	3,16	0,32	-5,91	10,41	0,19	-0,01	0,64	0,36
3	95,40	226,68	0,29	-1,53	3,11	0,34	-6,82	10,08	0,24	0,52	1,02	0,24
4	117,21	234,62	0,34	-1,50	2,88	0,27	-1,75	8,50	0,14	0,08	0,92	0,32
5	82,92	214,21	0,32	-1,54	3,01	0,26	0,13	10,15	0,14	-0,56	1,10	0,39
6	-	-	-	-1,11	2,50	0,31	-2,78	7,98	0,11	0,67	1,94	0,31
Domínio de 1km correspondente ao CS1_0500												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	139,90	267,66	0,32	-0,65	2,67	0,38	-1,55	7,28	0,27	0,74	1,53	0,41
2	120,68	252,51	0,30	-1,05	3,11	0,34	-3,06	9,90	0,21	0,08	0,68	0,36
3	100,05	233,21	0,33	-1,23	3,14	0,35	-4,05	10,01	0,22	0,28	0,76	0,27
4	123,86	253,15	0,32	-1,18	3,16	0,30	-1,76	8,84	0,16	-0,02	0,72	0,34
5	103,34	226,55	0,42	-1,23	3,04	0,34	1,31	9,32	0,21	-0,61	0,97	0,44
6	-	-	-	-0,79	2,70	0,29	-1,89	7,65	0,07	0,20	1,30	0,58
Domínio de 1km correspondente ao CS1_GFS												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	115,25	235,74	0,35	-1,23	3,21	0,33	-2,59	7,59	0,22	0,44	1,21	0,37
2	108,23	226,70	0,40	-1,42	3,71	0,37	-5,31	9,93	0,29	-0,01	0,71	0,29
3	112,95	236,92	0,41	-0,93	3,46	0,43	-7,62	11,23	0,23	0,41	0,94	0,10
4	101,63	209,31	0,45	-1,68	3,38	0,33	-1,59	8,17	0,25	-0,15	0,59	0,67
5	95,95	204,16	0,51	-1,31	3,30	0,37	-0,25	8,28	0,34	-0,50	0,83	0,61
6	-	-	-	-0,56	2,61	0,39	-3,70	7,60	0,28	1,24	1,93	0,34

Figura 4.14 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável radiação solar global em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados observados) em análise para o caso de estudo 01. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.



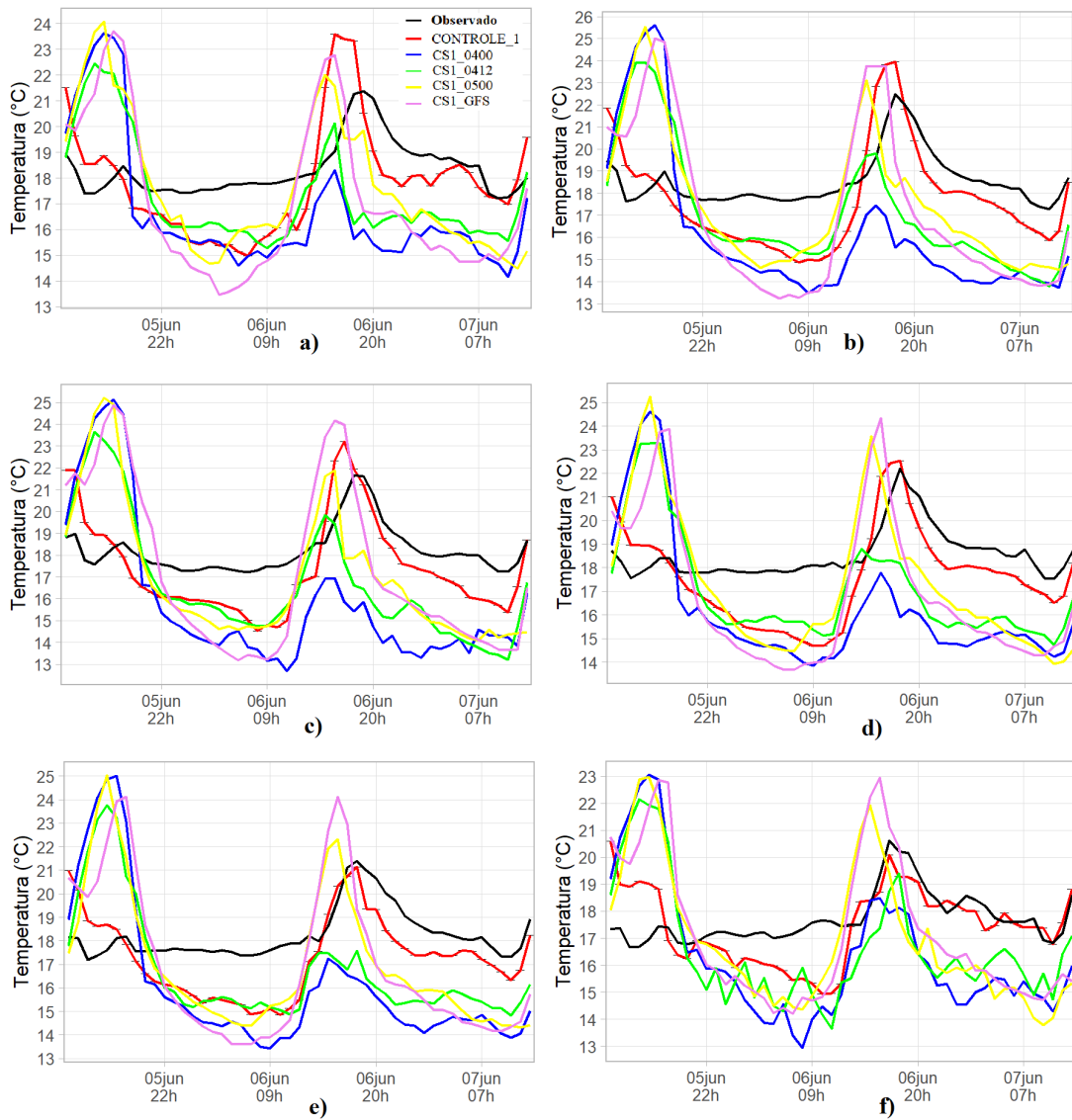
Fonte: Produção do autor.

Nos 4 conjuntos de simulações considerados, foram observados padrões semelhantes, com atrasos na chegada do sistema convectivo, o que se refletiu em picos de radiação no começo da simulação, algo que não foi observado nas estações em superfície. Outrossim, se observa que o evento simulado de precipitação ou a nebulosidade associada terminou antes do observado, pois a tendência de aumento da radiação no dia 6 de junho começou antes do observado. Essa última característica também foi observada na simulação CONTROLE_1, no entanto, com essa simulação conseguiu-se a melhor previsão, entre todos os casos analisados, para a variável radiação solar global em superfície.

Em relação a variável temperatura, dada a relação entre ambas variáveis, acontece uma situação análoga à radiação. Os dados observados mostram uma variação no ciclo diurno com temperaturas mais baixas que o esperado na tarde do dia 5, situação relacionada com o evento de precipitação (Figura 4.15). Na tarde do dia 6 observa-se a máxima temperatura no período. As simulações analisadas mostram dois momentos de temperaturas máximas absolutas, um deles na tarde do dia 5, que está relacionado com o atraso do começo da chuva pelo modelo em todas as simulações. Além da alta temperatura máxima no dia 5, observa-se também um alto valor para a temperatura máxima no dia 6, e este é previsto pelo modelo, porém de forma antecipada quando comparado com o observado. No entanto, em geral, observa-se uma subestimação desta variável, pois, como também foi descrito na simulação CONTROLE_1, durante boa parte do período de integração a temperatura prevista fica abaixo do observado. Para o caso das simulações pertencentes aos CS1_0400 e CS1_0412, em nenhuma das subáreas o segundo máximo previsto foi maior que o observado. O contrário aconteceu para as outras simulações em análises. E essa característica é capturada pelo índice EM que mostra os maiores valores modulares para ambos casos mencionados anteriormente.

O índice REQM mostrou valores semelhantes para todas as simulações e para todas as subáreas, variando entre 2,50 (subárea 6 do CS1_0412) e 4,17 (subárea 2 CS1_0400). Foi na subárea 6, de menor área urbanizada, que foram observadas as menores observadas, que se obtiveram em geral os melhores valores para este índice. Já na subárea 2, altamente urbanizada e onde se observou a maior temperatura, máxima, o índice apresentou os piores resultados.

Figura 4.15 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados da temperatura do JULES em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



Fonte: Produção do autor.

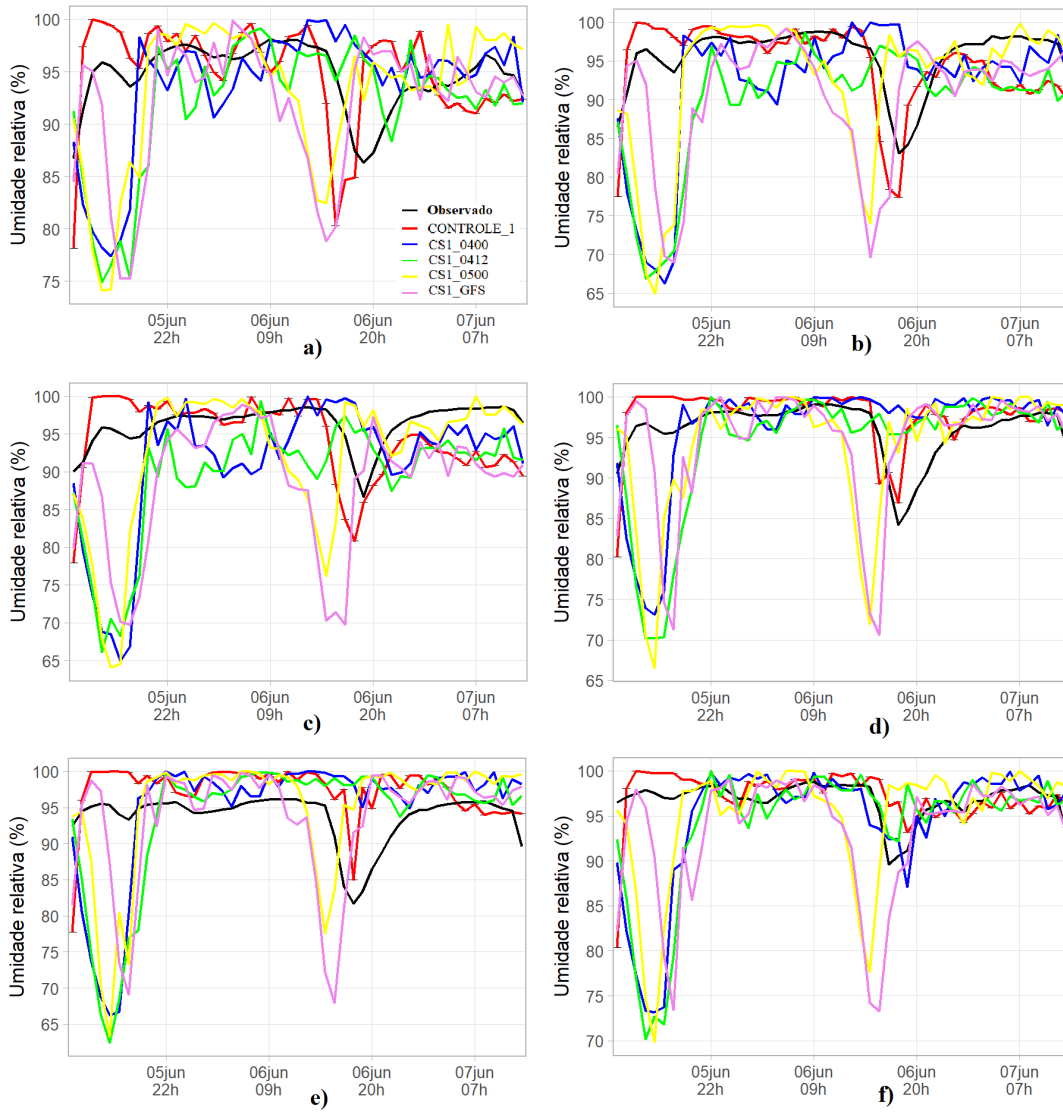
O coeficiente de correlação também se comportou de forma semelhante para quase todas as simulações, alcançando valores médios, em todas as subáreas, próximos de 0,3. No caso da simulação pertencente ao CS1_0400, os valores de CC foram em média menores que os associados às outras simulações, ficando em todas as subáreas abaixo de 0,28. Novamente, fica evidente que apesar da subestimação observada na simulação CONTROLE_1, foi esta a que melhor representou a variável temperatura durante o período em estudo quando comparado com os casos aqui analisados.

Uma vez que as simulações em estudo aqui não conseguiram representar corretamente a radiação e a temperatura, é esperado que a umidade relativa apresente características coerentes em relação ao comportamento da temperatura. A consequente diminuição da umidade relativa com o aumento da temperatura é observada em todas as subáreas analisadas. No começo da simulação, onde houve superestima dos valores de temperatura, agora se observa uma subestimação dos valores de umidade (Figura 4.16). Essa subestimação acontece em todas as subáreas e praticamente na mesma magnitude para todas as simulações em análise. Na tarde do dia 6 de junho a situação é diferente em relação à representação da umidade relativa prevista, a pesar de se manter a subestimação para as simulações relacionadas com os CS1_0500 e CS1_GFS, no caso das simulações associadas aos CS1_0400 e CS1_0412 se observa em algumas subáreas superestimação. Esse resultado para essas duas últimas simulações está vinculada ao fato das temperaturas previstas nesses intervalos de tempo serem menores que a observada como mostrado na Figura 4.15.

Os valores de EM indicam que, em geral, ocorreram subestimativas em todas as simulações e para quase todas as subáreas. Os valores de REQM ficaram entre 6,27 % (subárea 1 CS1_0400) e 11,23 % (subárea 3 CS1_GFS), sempre acima do obtido para a simulação CONTROLE_1, que não sobrepassou o valor de 6 % para este índice. Os melhores valores de REQM sempre foram obtidos para a subárea 1 e os piores para a subárea 3.

O coeficiente de correlação teve valores muito baixos em geral, menores que 0,34 em todos os casos. Para esse índice, vale destacar a subárea 6 que sempre esteve associada aos piores valores considerando cada simulação analisada. Essa situação está em parte relacionada com a baixa disponibilidade de dados observados e com o fato de se ter características menos urbanas nessa subárea.

Figura 4.16 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável umidade relativa em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 01. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.

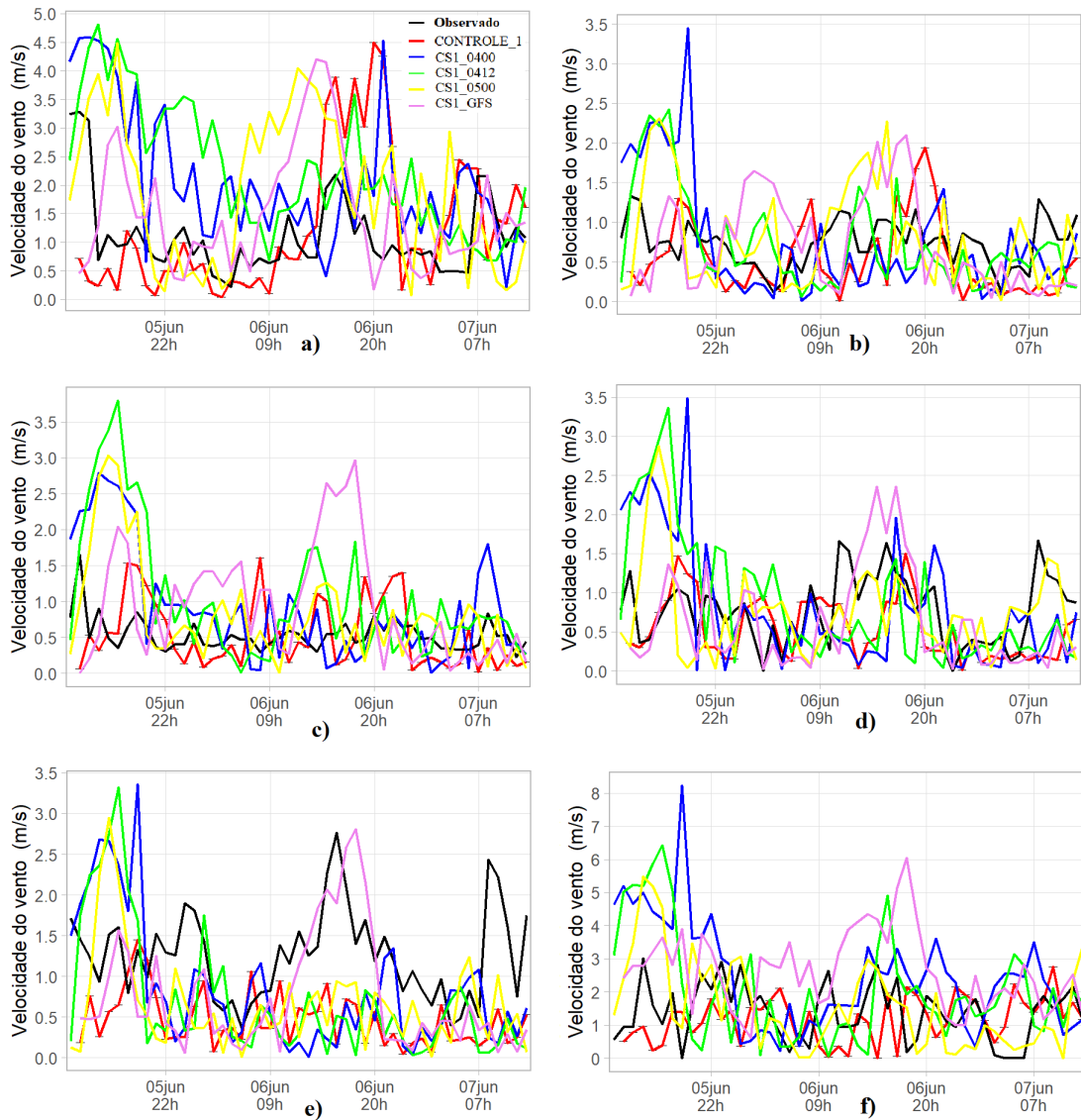


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.17 é apresentada a velocidade do vento média nas subáreas para o período das simulações. Se observa que nas primeiras horas da integração se produz o máximo valor absoluto dessa variável para as simulações pertencentes aos CS1_0400, CS1_0412 e CS_0500, e em todas as subáreas, com os resultados do modelo sempre superestimando o valor observado. Para o caso do CS1_GFS, o máximo absoluto é previsto para o período da tarde do dia 6 de junho, assim como o observado também em todas as subáreas. Outra característica observada é que nas subáreas 1 e 6, onde existe menos área urbanizada, a velocidade do vento prevista pelo JULES é maior em relação à observada nas outras subáreas.

Os valores de EM mostram que para a maior parte dos casos analisados, diga-se simulações e subáreas, observou-se superestimação geral desta variável velocidade do vento, quando são comparadas as médias dos dados simulados e as dos observados. Especificamente na subárea 5, para as 4 simulações, se obteve uma subestimação média desta variável, os valores observados nessa subárea ficaram acima dos registrados nas outras cinco. Os valores para o REQM ficaram entre 0,50 m/s, na subárea 4 do CS1_GFS, e 2,12 m/s, na subárea 6 do CS1_0400. No geral, a subárea 6 teve os piores valores para este índice e a subárea 2 os melhores. O coeficiente de correlação mostra valores relativamente altos na maior parte dos casos analisados, chegando acima de 0,6 nas subáreas 4 e 5 para o CS1_GFS. Na subárea 3, em média, se obteve os piores resultados para este índice, na simulação CS1_GFS o valor do CC para essa subárea foi de 0,10.

Figura 4.17 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável velocidade do vento do JULES em 10 m, e em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 1. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS1_0400 (cor azul), CS1_0412 (cor verde), CS1_0500 (cor amarela), CS1_GFS (cor roxa).

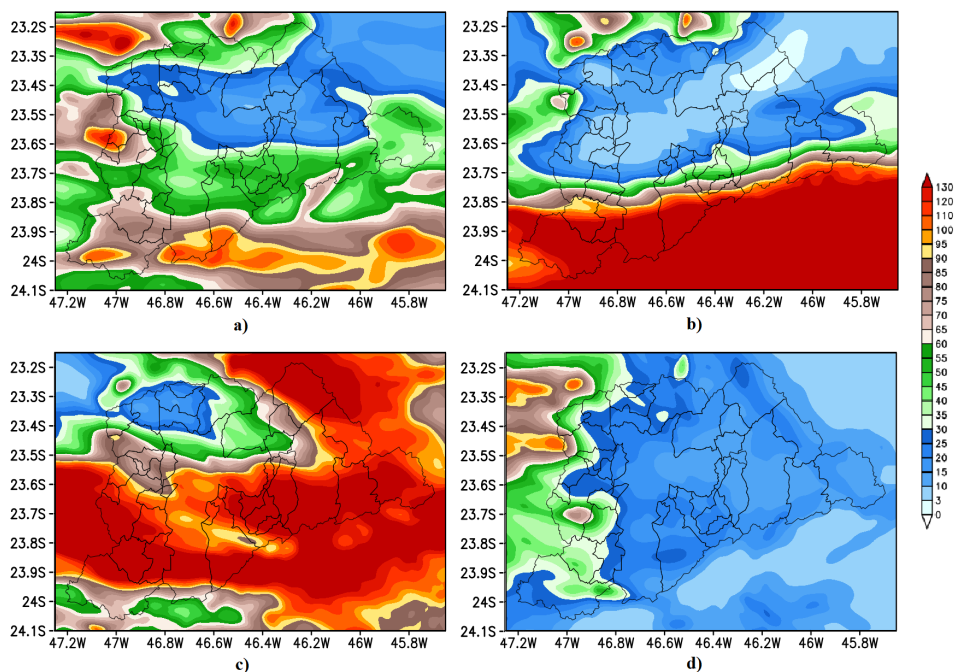


Fonte: Produção do autor.

Precipitação

Na Figura 4.18 são apresentadas as distribuições da precipitação total prevista pelo sistema de modelagem no domínio de 1 km, e associadas aos diferentes CS em análise, para o período observado de tempo severo (caso 01). Nos 3 primeiros casos, máximos de precipitação previstos na porção sul da RMSP, litoral, e sobre o Atlântico. No caso específico da simulação CS1_0500 (Figura 4.18c), valores acima de 100 mm foram previstos para boa parte da região, com exceção das sub-regiões Norte e Oeste. Para a simulação CS1_GFS os valores de precipitação ficaram majoritariamente abaixo de 30 mm, com áreas com chuva acima desse valor no extremo oeste da RMSP, mesma área que mostrou os maiores valores de umidade na condição inicial derivada dos dados de GFS. É clara a diferença marcada em relação com o CONTROLE_1, onde os valores ficaram na maior parte da região entre 40 mm e 90 mm.

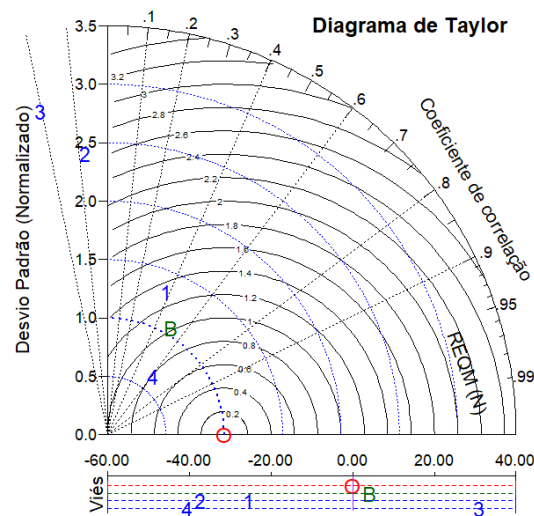
Figura 4.18 - Representação da precipitação total acumulada para a RMPS e áreas próximas no período entre as 12:00 UTC do dia 05/06/2017 e as 15 UTC do dia 06/06/2017. a) Simulação de 1 km CS1_0400, b) Simulação de 1 km CS1_0412, c) Simulação de 1 km CS1_0500, d) Simulação de 1 km CS1_GFS.



Fonte: Produção do autor.

No diagrama de Taylor, apresentado na Figura 4.19, é feita a representação dos resultados dos índices estatísticos obtidos ao comparar os dados previstos em cada simulação com os dados observados de precipitação em superfície. As simulações identificadas com os números 2 e 3, associadas aos CS1_0412 e CS1_0500, respectivamente, apresentaram os piores resultados, com os menores valores de coeficiente de correlação, maiores valores de desvio padrão e de REQM, como mostrado na Tabela 4.5. Em geral, se obteve subestimação da precipitação na RMSP, com exceção do CS1_0500 que mostrou uma superestimação. Em todos os casos, o índice REQM ficou acima do dobro do alcançado no CONROLE_1. O CC para o CS1_GFS foi de 0,61, o melhor resultado entre todos os CS analisados incluindo o CONTROLE_1.

Figura 4.19 - Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_1, 1->CS1_0400, 2-> CS1_0412, 3->CS1_0500, 4-> CS1_GFS.



Fonte: Produção do autor.

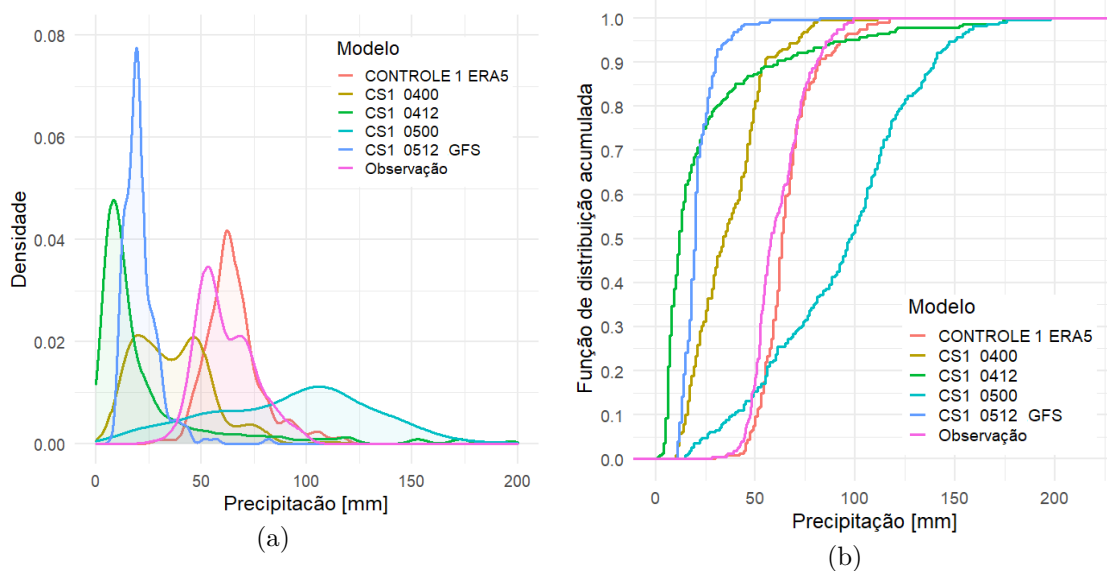
Tabela 4.5 - Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados às simulações da precipitação acumulada pertencentes aos CS1_0400, CS1_0412, CS1_0500 e CS1_GFS na comparação com os valores observados.

Dados\Índices	DP	REQM	CC	EM(Viés)
Estações	13,3	0	1	0
BRAMS-JULES CONTROLE (B)	13,8	14,0	0,51	4,2
CS1_0400 (1)	17,6	30,8	0,37	-25,35
CS1_0412 (2)	32,2	51,6	-0,08	-37,2
CS1_0500 (3)	37,4	52,5	-0,20	31,1
CS1_GFS (4)	8,4	41,8	0,61	-40,5

As curvas de densidade associadas aos acumulados de chuva (Figura 4.20) simulado em cada ponto geográfico onde também foi monitorada a variável nas estações e pluviômetros em superfície, mostram a subestimação mencionada anteriormente para todos os conjuntos de simulações, exceto o CS1_0500. Na Figura 4.20(a) são observados os picos de densidade abaixo de 50 mm para os CS que subestimaram e acima de 100 mm para o CS1_0500. O intervalo de valores de acumulado total de precipitação previsto pela simulação associada ao CS1_GFS foi pequeno em comparação com os outros, o que justifica o baixo valor de desvio padrão (8,4 mm) para esta simulação.

No gráfico de distribuição acumulada (Figura 4.20(b)) também se observa as características de subestimação e superestimação tratadas anteriormente. As simulações dos CS1_0400, CS1_412 e CS1_GFS tiveram aproximadamente 80 %, 87 % e 98 % de todos seus dados abaixo de 50 mm, respectivamente, enquanto que 20 % dos dados observados ficaram iguais ou abaixo de 50 %. Já o CS1_0500 teve aproximadamente 15 % nesse intervalo. A simulação do CS1_GFS teve aproximadamente 43 % dos dados previstos acima de 100 mm, os valores observados não mostraram registros acima desse valor.

Figura 4.20 - Representação dos acumulados de precipitação associados às simulações pertencentes aos CS1_0400, CS1_0412, CS1_0500 e CS1_GFS. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.



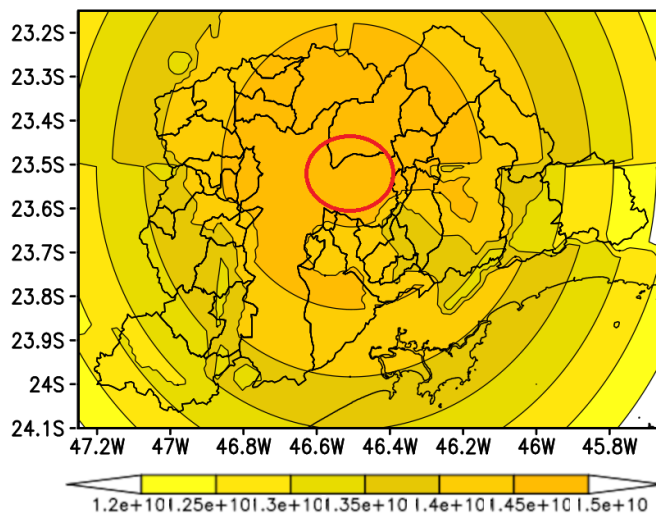
Fonte: Produção do autor.

4.3 Caso de estudo 02: 24, 25 e 26 fevereiro de 2017.

4.3.1 Resultados da simulação CONTROLE_2.

Neste caso de estudo, o procedimento de análise foi análogo ao caso anterior. Os parâmetros relacionados com a microfísica de nuvens analisados no Item 4.1 foram empregados da mesma forma nas simulações associadas a este caso de estudo para a obtenção do CONTROLE_2. Na Figura 4.21, a distribuição espacial da concentração numérica de aerossóis na superfície da RMSP utilizada neste caso foi também obtida dos dados do GOCART. A região delimitada pela linha vermelha indica a área onde o valor da concentração foi maior para o domínio de 1km de resolução espacial. Essa área ficou quase na mesma localização que no caso de estudo 1, levemente menor e com um pequeno deslocamento para o sul. O valor máximo de concentração foi de $1.49497E+10$, sendo que $1.49489E+10$ /kg corresponde a NCN e 827437 /kg corresponde a NG.

Figura 4.21 - Distribuição espacial da concentração numérica de aerossóis na superfície da RMSPP utilizados na microfísica de nuvens pelo BRAMS-JULES no caso de estudo 02. Valores em /kg. A linha vermelha delimita a região onde foi considerado a maior concentração de aerossóis na superfície dentro do domínio de 1 km.

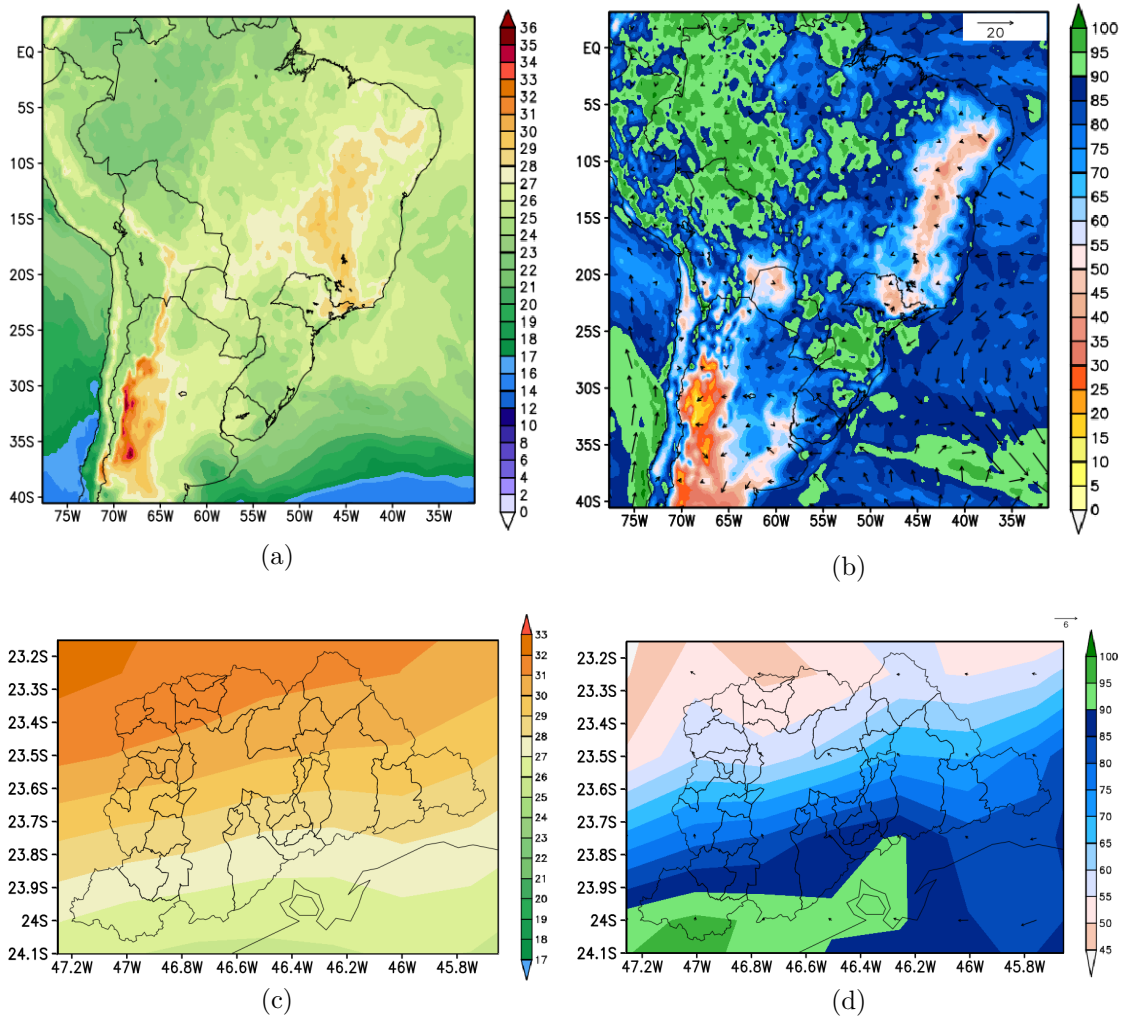


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.22 é mostrada a representação espacial de algumas variáveis utilizadas para a inicialização da simulação domínio de 10 km com o BRAMS-JULES. Como antes especificado, os dados são provenientes do ERA5. A variável temperatura no momento inicial mostra uma região de valores mais elevados sobre parte de alguns estados localizados no Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do Brasil (Figura 4.22(a)). Essa área inclui parte do nordeste do Estado de São Paulo, incluindo a RMSPP, que apresenta valores de temperatura entre 26 °C e 32 °C, numa distribuição de faixas quase zonais sobre os 39 municípios, como observado na Figura 4.22(c).

A representação da umidade relativa (Figura 4.22(b)) mostra máximos valores sobre as regiões Norte e Sul do Brasil. No Estado de São Paulo se observa uma região de baixos valores ao norte e nordeste e altos valores no extremo sudeste, criando-se uma zona de alto gradiente da variável que inclui a RMSPP (Figura 4.22(d)). No momento inicial das simulações que compõem o conjunto associados ao CONTROLE_2 observa-se valores de umidade relativa inferiores a 50 % no extremo norte da RMSPP e acima de 90 % no extremo sul.

Figura 4.22 - Representação dos dados do ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 24/02/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície ($^{\circ}\text{C}$) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície ($^{\circ}\text{C}$) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.



Fonte: Produção do autor.

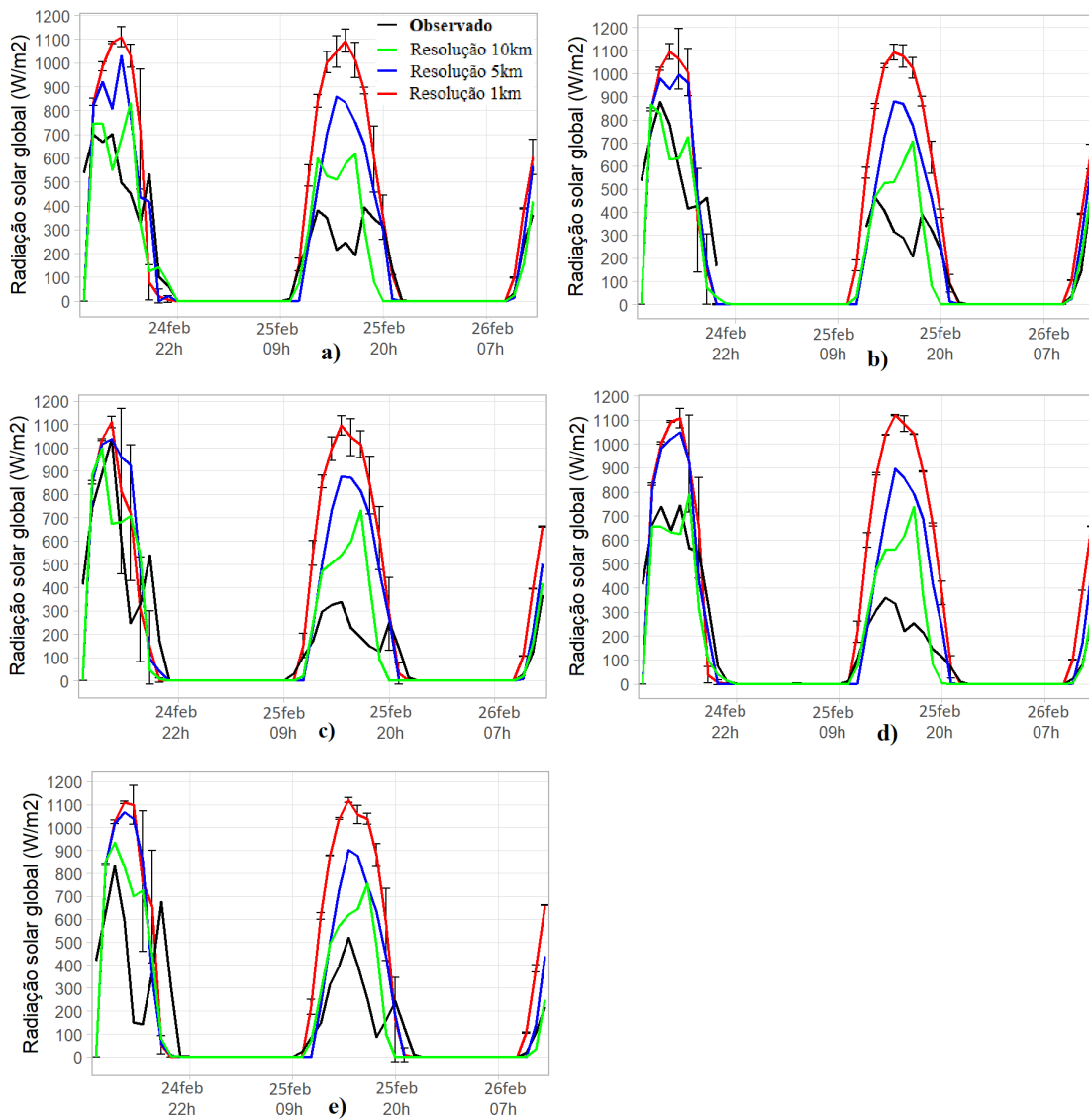
Neste caso de estudo, o evento de precipitação começou 3 horas depois da inicialização das simulações. A seguir é apresentada a análise dos resultados obtidos nas diferentes simulações do CONTROLE_2.

A variável radiação solar global, em geral, foi pelo modelo nos três domínios utilizados (Figura 4.23). Essa superestimação ocorre nos dois máximos observados no período de integração, e em maior ou menor medida em todas as subáreas analisadas. Na tarde do dia 24, os dados observados nas estações indicam no começo a tendência de aumento da radiação até que, posteriormente, se produza uma queda marcada da mesma associada com o começo do evento de precipitação. Essa característica específica não foi observada tão claramente nos dados previstos pelo modelo, o que é evidente é a antecipação da tendência de diminuição dos valores de radiação quando comparados com os de um ciclo diurno típico de um dia de verão. No entanto, fica explícito nesta análise que a previsão do começo do evento severo de precipitação teve um atraso em relação ao observado. Lembrando que neste caso específico as condições da atmosfera que favoreceram a ocorrência do evento de precipitação são diferentes do primeiro estudo de caso e relacionadas com o aquecimento típico do verão e a circulação em níveis médios da atmosfera. A precipitação teve características mais pontuais, o que dificulta a previsão de forma geral e também a análise dos resultados considerando a comparação com os dados observados.

No caso da variável radiação solar global, que como mencionado anteriormente foi registrada em poucas estações, a comparação entre a média de uma área, onde não se teve nebulosidade cobrindo toda ela, com a média das estações pode influenciar nas diferenças observadas. No segundo pico de máxima radiação na tarde do dia 25, os valores observados nas estações foram menores que o normal pela influência da nebulosidade associada a um evento de ZCAS que teve início nesse dia. A RSMP ficou no limite sul da faixa de nebulosidade e o modelo fez a previsão deste sistema deslocado um pouco mais ao nordeste, o que resultou em menor nebulosidade sobre a região e maior radiação registrada na superfície.

Essas superestimações observadas nos dois dias de previsão foram maiores no domínio de 1 km de resolução espacial. Os índices estatísticos calculados considerando este domínio são apresentados na Tabela 4.6. Os valores de EM confirmam a superestimação em todas as subáreas, enquanto o índice REQM ficou entre 299,15 W/m^2 para a subárea 3 e 353,05 W^2 para a subárea 5, valores considerados altos. O coeficiente de correlação ficou acima de 0,68 em todas as subáreas.

Figura 4.23 - Representação gráfica dos valores médios horários da radiação solar global observados e simulados em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.



Fonte: Produção do autor.

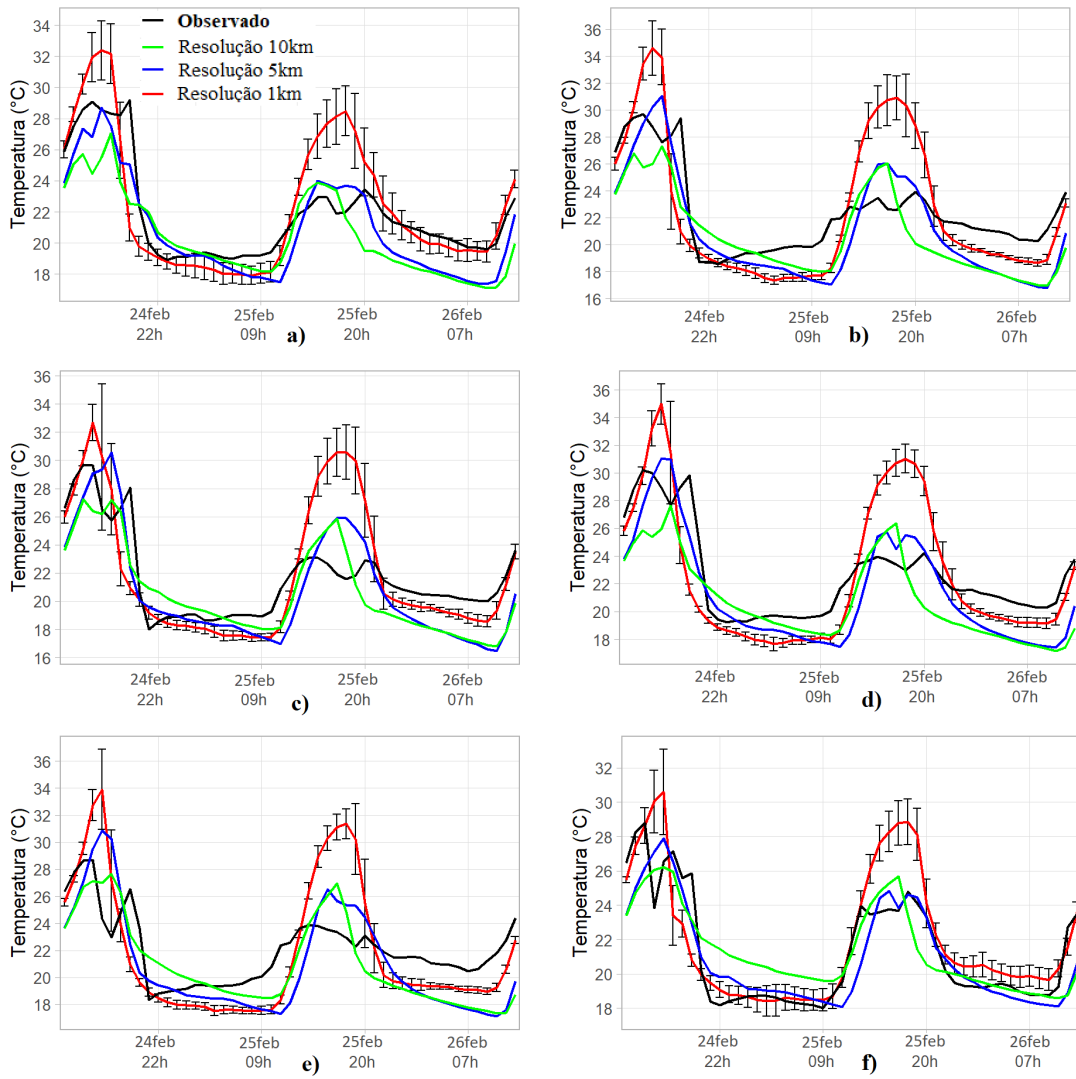
Tabela 4.6 - Valores dos diferentes índices estatísticos adotados para avaliar o desempenho do modelo para as variáveis meteorológicas em todas as subáreas dentro da RMSP e para o caso 02 de estudo. São comparados os dados observados e os simulados com o domínio de 1 km de resolução, no período de 48 horas.

Subárea\ Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	130,19	313,61	0,74	0,45	2,45	0,88	5,90	11,55	0,76	-0,55	1,07	0,63
2	156,97	336,75	0,76	0,11	3,48	0,80	4,63	13,88	0,73	-0,54	1,06	0,41
3	117,47	299,25	0,76	0,26	3,14	0,81	1,20	13,34	0,7	0,01	0,76	0,56
4	148,37	311,96	0,76	-0,01	3,27	0,83	7,68	15,75	0,67	-0,30	1,18	0,34
5	150,26	353,05	0,68	-0,17	3,41	0,76	8,00	15,72	0,62	-0,68	1,14	0,50
6	-	-	-	0,77	2,13	0,89	-4,18	10,11	0,77	0,33	1,24	0,45

Na Figura 4.24 são apresentados os gráficos para a variável temperatura nas 6 subáreas. Da mesma forma que aconteceu com a radiação, ocorre uma superestimação pelos valores simulados nas tardes dos dias 24 e 25 de fevereiro, sendo em menor medida no dia 24. Em todas as subáreas os valores observados nas estações apresentaram dois máximos relativos na tarde do dia 24. Essa característica também se observa nos dados associados ao domínio de 10 km, com exceção da subárea 6, e no domínio de 5 km para a subárea 1. Já para o domínio de 1km de resolução os gráficos mostram uma tendência de aumento nas primeiras horas da simulação e depois uma queda brusca mantendo valores em torno de 18 °C até o final da manhã do dia 25.

O EM (Tabela 4.6) indica para o domínio de 1km de resolução espacial uma superestimação geral considerando as médias nas subáreas 1, 2, 3 e 6 e uma subestimação nas subáreas 4 e 5. O índice REQM ficou entre 2,13 °C , para a subárea 6, e 3,48 °C na subárea 2. A subárea 2, que inclui o centro do município de São Paulo, apresentou os piores resultados, isso em parte devido à alta urbanização dessa área, e com características bem heterogêneas na constituição dos materiais da superfície e que são difíceis de representar no sistema de modelagem, mesmo utilizando um modelo de superfície como o JULES. A área 6 teve os melhores resultados, junto com a 1, elas são menos urbanizadas. Em todas as subáreas se obteve valores de coeficientes de correlação acima de 0,75, valor considerado satisfatório.

Figura 4.24 - Representação gráfica dos valores médios horários para a variável temperatura observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.

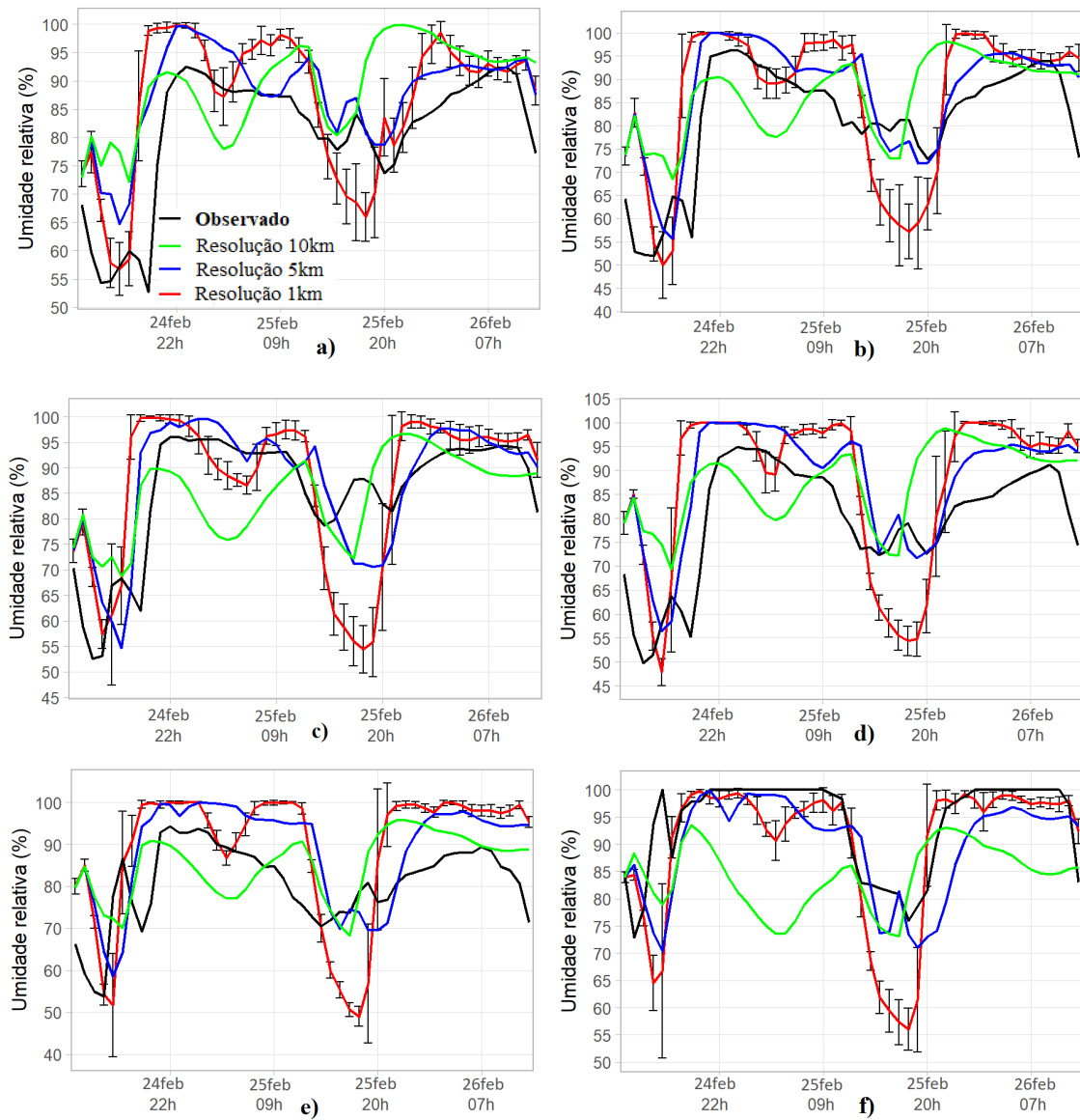


Fonte: Produção do autor.

A variável umidade relativa, observada nas estações, teve como principal característica valores abaixo de 60 % no começo do período de simulação para todas as subáreas, exceto a 6, que dadas as condições da superfície apresentou valores maiores (acima de 70 %). Posteriormente, se observou um acentuado aumento dos valores para esta variável (ver Figura 4.25). Na umidade relativa, à semelhança da radiação solar global, existem diferenças acentuadas entre os resultados previstos para os 3 domínios utilizados. No geral, o domínio de 10 km de resolução previu valores mais baixos que os outros dois domínios. Durante o primeiro dia de previsão o domínio de 1km teve o melhor desempenho, capturando os baixos valores de umidade no começo e o aumento depois das primeiras horas do período em análises. No entanto, observa-se uma superestimação durante os períodos de máximos valores, e uma subestimação evidente para todas as subáreas durante a tarde e começo da noite do dia 25.

Os valores dos índices estatísticos confirmam o que mostram os gráficos. O EM mostra superestimação considerando todo o período para as subáreas com exceção da 6, destaque para a subárea 5 onde é visível a diferença maior, nos horários de máximos valores, entre valores simulados e observados. O índice REQM indica que as subáreas 4 e 5 foram as com piores resultados, com valores acima de 15 %, e a subárea 6 foi a melhor, com um valor de 10,11 %. O coeficiente de correlação também foi menor para as subáreas 4 e 5, ficando abaixo de 0,7, enquanto nas outras ficou acima desse valor.

Figura 4.25 - Representação gráfica dos valores médios horários da umidade relativa observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



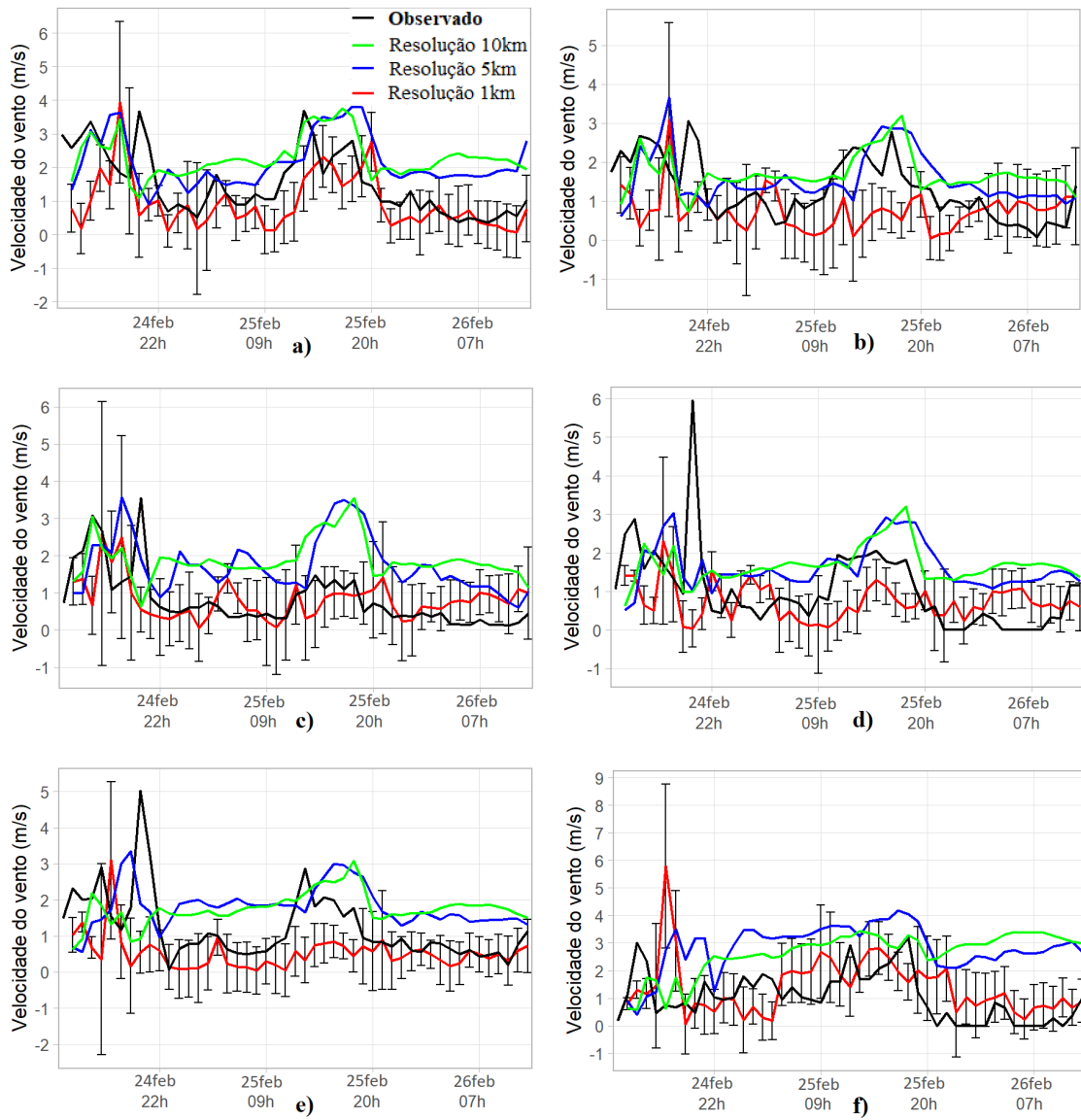
Fonte: Produção do autor.

Em relação à velocidade do vento, temos que na maior parte do período analisado, e em todas as subáreas, os valores previstos pelo modelo nos domínios de 10 km e 5 km de resolução espacial foram maiores em relação aos previstos pela simulação do domínio de 1km de resolução (Figura 4.26). Os dois primeiros domínios no geral superestimaram o vento em relação com o observado enquanto o domínio de 1 km tende a subestimar.

Os valores máximos observados ocorrem durante as horas do evento de precipitação intensa, com destaque para as subáreas 4 e 5, que mostram picos elevados de velocidade do vento no começo da noite do dia 24, valores acima de 5 m/s em ambos casos. Os picos não são previstos da mesma forma pelo modelo, mas é evidente um aumento do desvio padrão nas horas do evento severo para o domínio de 1km de resolução espacial, indicando a dispersão dos valores ao redor da média. Um segundo período de máximo relativo é identificado no final da manhã e na tarde do dia 25.

Os valores previstos de velocidade do vento no domínio menor ficaram na maior parte do período muito próximos dos observados. O índice EM indica superestimação nas subáreas 2, 3 e 6, e subestimação nas subáreas 1, 4 e 5. O índice REQM teve valores entre 0,76 m/s para a subárea 3 e 1,24 m/s para a subárea 6. O CC ficou entre 0,34 para a subárea 4 e 0,63 para a subárea 1.

Figura 4.26 - Representação gráfica dos valores médios horários da velocidade do vento observados e simulados em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para os 3 domínios utilizados(10 km, 5 km, 1 km). Linhas verticais representam o desvio padrão horário considerando cada subárea e para o domínio de 1 km de resolução. a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



Fonte: Produção do autor.

Precipitação

Neste caso de estudo, a avaliação da precipitação a partir da comparação entre os dados simulados, os produtos derivados de satélites e os dados observados nas estações em superfície considerou o período de 9 horas entre as 15:00 UTC do dia 24/02/20217 e 00:00 UTC do dia 25/02/2017. Os valores dos acumulados totais são menores que no caso de estudo anterior.

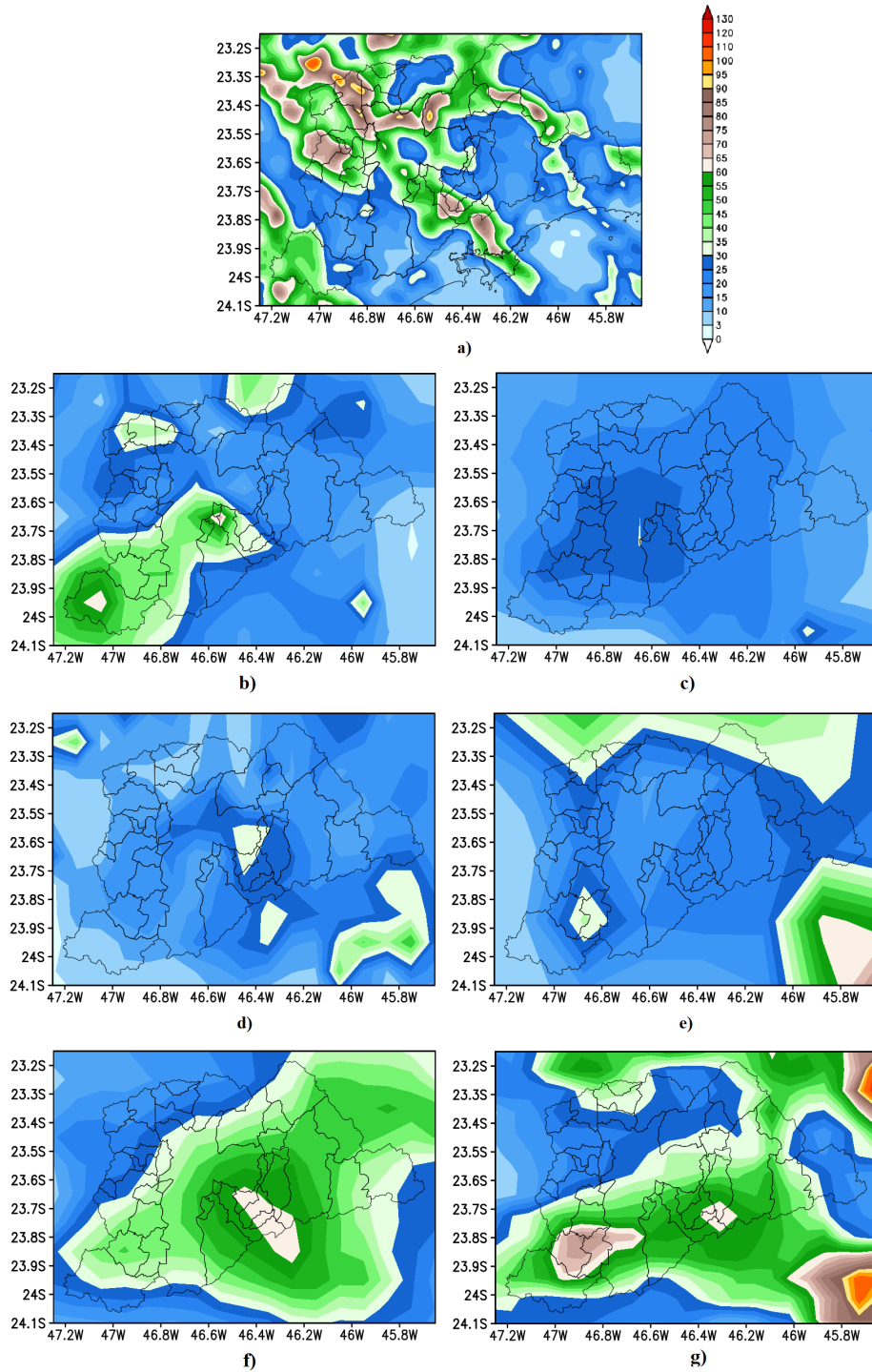
Na Figura 4.27 encontra-se a distribuição espacial da precipitação acumulada total no período de estudo para todos os produtos derivados de satélite em análise e para a previsão do BRAMS-JULES. O sistema de modelagem previu áreas de maior acumulado de precipitação dispersas por toda a RMSP, mas destaca-se uma faixa de altos valores entre as sub-regiões Oeste e a Sudeste, onde em alguns pontos os acumulados são acima de 90 mm (Figura 4.27a). Áreas com acumulados acima de 60 mm são encontradas também em todas as outras sub-regiões. Já o MERGE mostra os valores máximos acumulados sobre a sub-região Sudoeste, com destaque para o município de Juquitiba, e também sobre a sub-região Sudeste (Figura 4.27b). Outro máximo relativo foi observado sobre a fronteira entre as sub-regiões Oeste e Norte. O GSMaP-C apresentou um máximo absoluto de acumulado de precipitação localizado no sul do município de São Paulo, e valores que não ultrapassaram os 30 mm para toda a RMSP (Figura 4.27c).

O produto GPM_3IMERGHH mostra uma área que se estende entre o centro do município de São Paulo até o extremo sul de Santo André, na sub-região Sudeste, com acumulados acima de 25 mm e máximos de até 35 mm (Figura 4.27d). No restante da RMSP esse produto estimou valores inferiores a 20 mm, sendo menores a 10 mm em zonas das sub-regiões Norte, Oeste e Sudoeste. Por sua vez, o produto TRMM_3B42RT estimou valores acima de 30 mm no extremo norte da RMSP e também no interior da sub-região Sudoeste (Figura 4.27e). Ao sul da sub-região Leste outro máximo é localizado com valores acima de 60 mm.

Os produtos GSMaP não calibrado e o CMORPH foram os que, em geral, estimaram os maiores acumulados totais de precipitação para a RMSP. Em ambos casos, a maior parte da região teve precipitação estimada acima de 30 mm, com localidades acima de 60 mm. O GSMaP não calibrado tem o máximo absoluto sobre a sub-região Sudeste (Figura 4.27f). O CMORPH apresenta uma zona de máximos valores de acumulado sobre a sub-região Sudoeste e Sul do município de SP e outro na fronteira entre as sub-regiões Leste e Sudeste, ao sul do município Suzano.

No geral, são observadas diferenças acentuadas entre as estimativas dos diferentes produtos derivados de satélite. Não se repete um padrão de distribuição da precipitação total, evidenciando a dificuldade de realizar esse processo para eventos de precipitação que não são totalmente associados a sistemas meteorológicos de grande escala. A sub-região Sudeste foi a única que esteve nas áreas de máximos relativos para cada estimativa, com exceção do produto TRMM_3B42RT, e também na previsão do sistema de modelagem. Essa mesma região teve a maior densidade de registros de descargas elétricas, como visto na Figura 3.16, e nela também se observam picos de refletividade nas imagens de radar (Figura 3.15).

Figura 4.27 - Representação da precipitação total acumulada para a RMSP e áreas próximas no período entre as 15:00 UTC do dia 24/02/2017 e as 00 UTC do dia 25/02/2017 referente ao caso 01. a) Simulação de 1 km de resolução espacial para o CONTROLE_2, b) MERGE, c) GSMaP-C, d) GPM_3IMERGHH, e) TRMM_3B42RT, f) GSMaP, g) CMORPH.



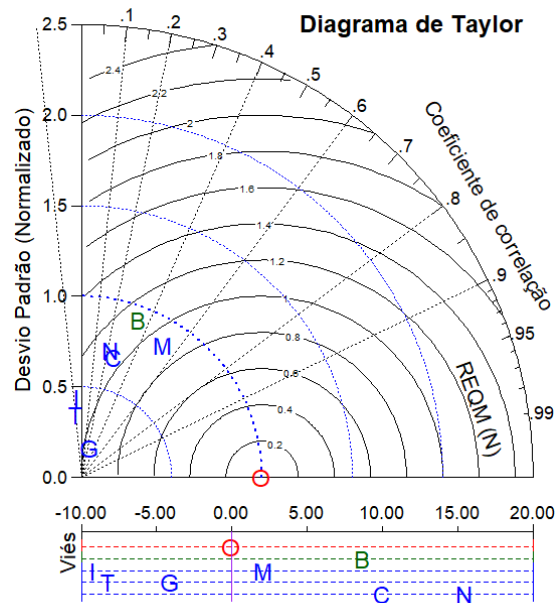
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.28, a representação no diagrama de Taylor dos diferentes valores dos índices estatísticos associados às análises dos diferentes produtos de precipitação, na Tabela 4.7 os valores dos índices sem ser normalizados. Nesta análise está sendo considerado o período de chuva intensa mencionado anteriormente e a comparação é feita entre os totais de precipitação, em todo o período, registrados em 211 pontos em superfície e simulados ou estimados pelos produtos derivados de satélite nos mesmos pontos. Observa-se que, em geral, o GSMaP-C, o GPM_3IMERGHH e o TRMM_3B42RT subestimaram a precipitação na RMSP, enquanto os restantes, incluindo o BRAMS-JULES com os resultados para o domínio de 1km, superestimaram. O REQM ficou entre 16 mm e 26 mm (Tabela 4.7), valores relativamente altos, mas podem ser considerados satisfatórios considerando que foram registrados acumulados totais acima de 70 mm em várias estações. Outro fator que contribui com esses valores é a característica do evento meteorológico, associado com fatores locais e com a atuação de núcleos convectivos diversos e dispersos pela região de estudo.

O modelo apresentou o segundo melhor valor de índice de concordância ($CC = 0,34$), e valores das outras métricas comparáveis com os produtos de satélites que são hoje as ferramentas mais utilizadas nos estudos de precipitação. O desvio padrão dos dados simulados foi muito próximo ($DP=16,7$ mm) do obtido para os dados observados ($DP = 18,1$), e o melhor quando considerados todos os dados analisados.

Em geral, o MERGE apresentou novamente a melhor performance, evidenciando a importância de uma calibragem a partir dos dados registrados nas estações.

Figura 4.28 - Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação, caso de estudo 02. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_2, M->MERGE, G-> GSMaP-C, N->GSMaP não calibrado, I-> GPM_3IMERGHH, T-> TRMM_3B42RT e C-> CMORPH.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.7 - Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados aos produtos de precipitação derivados de satélites e à previsão para esta variável feita pelo BRAMS-JULES (ao comparar com os dados observados), assim como para os dados observados nas estações. Caso de estudo 02, fevereiro de 2017.

Dados\Índices	DP	REQM	CC	EM(Viés)
Estações (O)	18,1	0	1	0
BRAMS-JULES (B)	16,7	21,8	0,34	8,6
MERGE (M)	15,4	16,6	0,53	2,1
GSMaP-C (G)	3	18	0,26	-4,1
GSMaP (N)	13,1	25,1	0,23	15,5
GPM_3IMERGHH (I)	8	22,1	-0,10	-9,3
TRMM_3B42RT (T)	6	21,3	-0,10	-8,2
CMORPH (C)	12,4	21,6	0,26	10

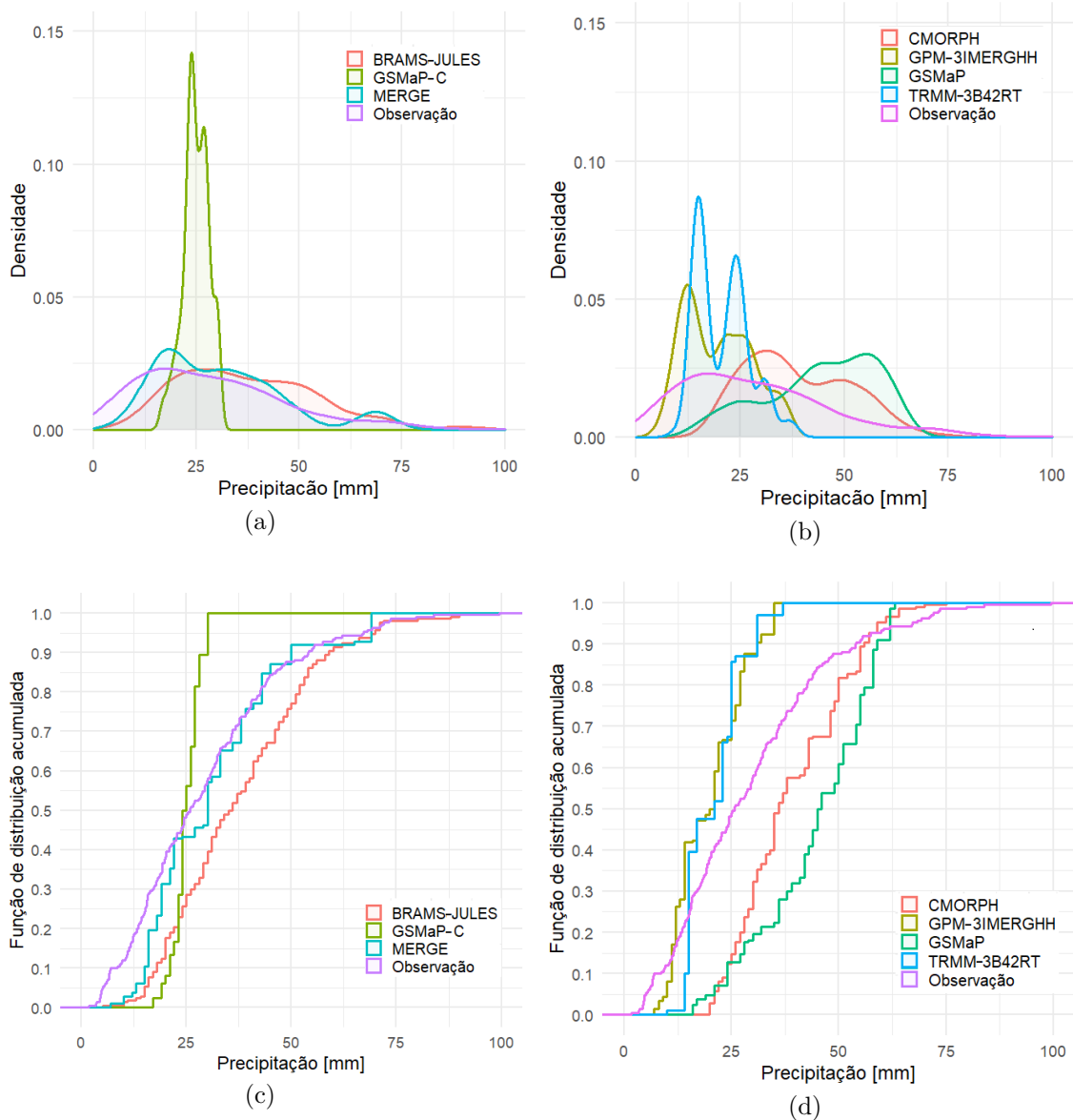
Na Figura 4.29(a) e 4.29(b) são mostrados os gráficos de densidade onde são consideradas as quantidades de pontos que registraram valores específicos de acumulados totais de precipitação durante o período em estudo. Os dados observados em superfície tiveram a maior quantidade de estações registrando valores entre 10 mm e 45 mm, com o intervalo entre 10 mm e 25 mm como o de maiores valores de densidade. Novamente a distribuição da densidade associada ao MERGE foi a mais próxima da dos dados observados. O BRAMS-JULES também teve muita semelhança com observado nesta análise de densidade, mas o pico ficou entre 25 mm e 30 mm, o que explica, em parte, a superestimação descrita anteriormente. O GSMaP-C teve todos os valores de precipitação total acumulada, associados aos pontos em superfície aqui tratados, entre 15 mm e 30 mm, explicando o baixo valor de desvio padrão para este produto (Figura 4.29(a)).

Na Figura 4.29(b) observa-se que as distribuições de densidade associadas aos produtos GPM_3IMERGHH e TRMM_3B42RT ficaram concentradas no intervalo entre 5 mm e 40 m. Já para os produtos CMORPH e GSMaP não calibrado os picos de densidade ocorreram para acumulados de precipitação acima de 30 mm.

Nas gráficas de distribuição acumulada (Figura 4.29(c)) observa-se a semelhança entre os dados do MERGE e os observados nas estações em superfície. Os dados previstos pelo BRAMS-JULES apresentam um deslocamento leve para direita em relação com os dados observados, e os dados do GSMaP-C um deslocamento para esquerda, evidência da superestimação e subestimação respectivamente, dos dois produtos. Da mesma forma, acontece para os outros quatro produtos, enquanto GPM_3IMERGHH e TRMM_3B42RT tiveram um deslocamento para esquerda, os produtos CMORPH e GSMaP não calibrado tiveram um deslocamento para direita (Figura 4.29(d)). Nos dois primeiros, a precipitação total foi subestimada, e nos dois últimos, superestimada.

No geral, os resultados mostraram a viabilidade da utilização da simulação em análise com o BRAMS-JULES para o estudo de sensibilidade.

Figura 4.29 - Representação dos acumulados de precipitação para os dados observados e os resultados derivados de produtos de satélite e os previstos pelo BRAMS-JULES, especificamente para a simulação no domínio de 1 km de resolução espacial, caso de estudo 02. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de melhor desempenho), (b) Densidade de acumulados totais de precipitação (produtos de pior desempenho), (c) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de melhor desempenho), (d) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total (produtos de pior desempenho).



Fonte: Produção do autor.

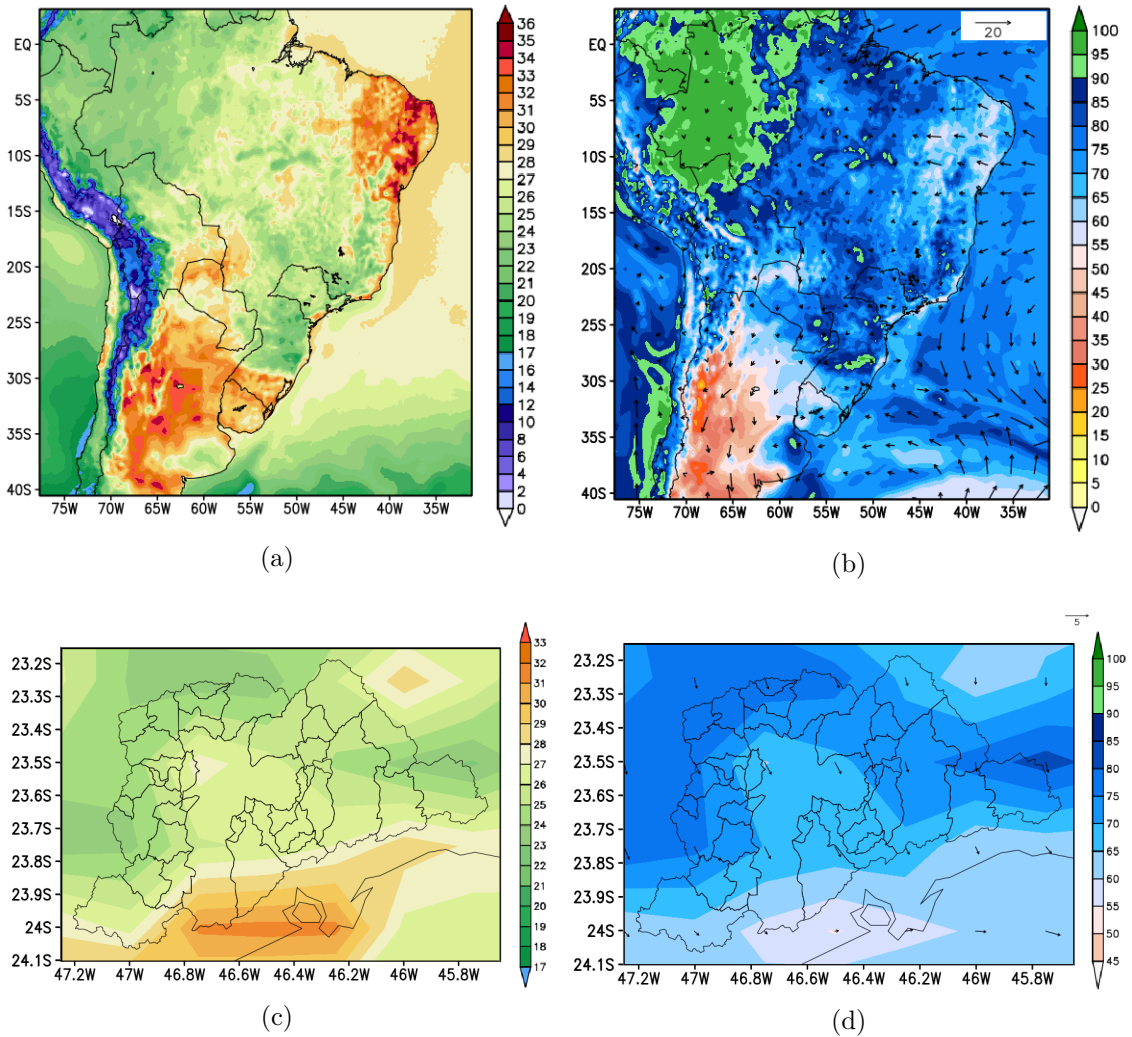
4.3.2 Estudo do impacto das mudanças nas condições iniciais e de contorno nos resultados das simulações para o caso de estudo 02.

Aqui, como feito na Seção 4.2.2, serão analisados os resultados dos diferentes conjuntos de simulações realizados para estudar o impacto das condições iniciais e de contorno na previsão do evento de tempo severo de precipitação sobre a RMSP. Na Tabela 3.7 são apresentadas as características dos conjuntos de simulações (CS) aqui analisados.

Na Figura 4.30, é feita a representação de variáveis meteorológicas para o domínio de 10 km e sobre a RMSP derivadas do modelo GFS para o dia 24/02/2017 às 12:00 UTC, momento em que também se inicializa o CONTROLE_2. Para a variável temperatura (Figura 4.30(a)) se observa uma região de máximos valores sobre o Nordeste do Brasil, na Argentina, no Paraguai, sul de RS e na faixa litorânea da região Sudeste do Brasil que inclui o sul da RMSP (Figura 4.30(c)). Essa distribuição espacial difere da mostrada anteriormente para o ERA5 nesse mesmo horário. Enquanto os dados do ERA5 mostram os maiores valores de temperatura no norte da RSMP, os dados provenientes do GFS mostram os maiores valores no sul da região. Quase a totalidade da RMSP apresenta valores de temperaturas, no momento inicial do CS2_GFS, abaixo de 28 °C.

A umidade relativa também apresenta diferenças significativas em relação a os dados do ERA5. Na Figura 4.30(b) é feita a representação espacial desta variável nos dados derivados do GFS para o dia 24/02/2017 às 12:00 UTC. Os máximos valores são observados sobre a região Norte do Brasil, com algumas localidades no restante do país mostrando valores acima de 90 %. No Brasil continuam sendo o Nordeste e algumas localidades do Sudeste onde se alcançam os menores valores de umidade relativa, mas não na mesma proporção que o observado nos dados derivados do ERA5. No Estado de São Paulo, só uma pequena faixa no litoral sul apresenta valores abaixo de 50 %, no restante do estado valores são maiores, e chegam até 90 % no extremo oeste. Sobre a RMSP (Figura 34.30(d)) os valores de umidade variam entre 55 %, na porção sul, e 85 % no extremo leste do município de Salesópolis. Para esta variável também se inverte a distribuição dos valores quando se compara o GFS com o ERA5. Enquanto no GFS os maiores valores ficam mais para o norte da região, no ERA5 ficam mais no extremo sudoeste.

Figura 4.30 - Representação dos dados do GFS (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs>), para variáveis meteorológicas empregadas na inicialização do BRAMS-JULES nas simulações com resolução de 10 km, para o dia 24/02/2017 às 12:00 UTC. (a) Temperatura em superfície ($^{\circ}\text{C}$) no domínio de 10 km, (c) umidade relativa e vento em superfície no domínio de 10 km, escala de cores referente aos valores de umidade. (b) Temperatura em superfície ($^{\circ}\text{C}$) sobre a RMSP, (d) Umidade e vento em superfície sobre a RMSP, escala de cores referente aos valores de umidade.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes índices estatísticos calculados considerando o domínio de 1km de resolução espacial das simulações do caso 02 de estudo apresentadas na Tabela 3.7. Igual a o caso anterior são consideradas as 6 subáreas e o período de 48 de integração para cada simulação. A seguir é apresentada uma análise comparativa dos resultados para as simulações anteriormente especificadas considerando algumas variáveis meteorológicas e os resultados dos índices estatísticos.

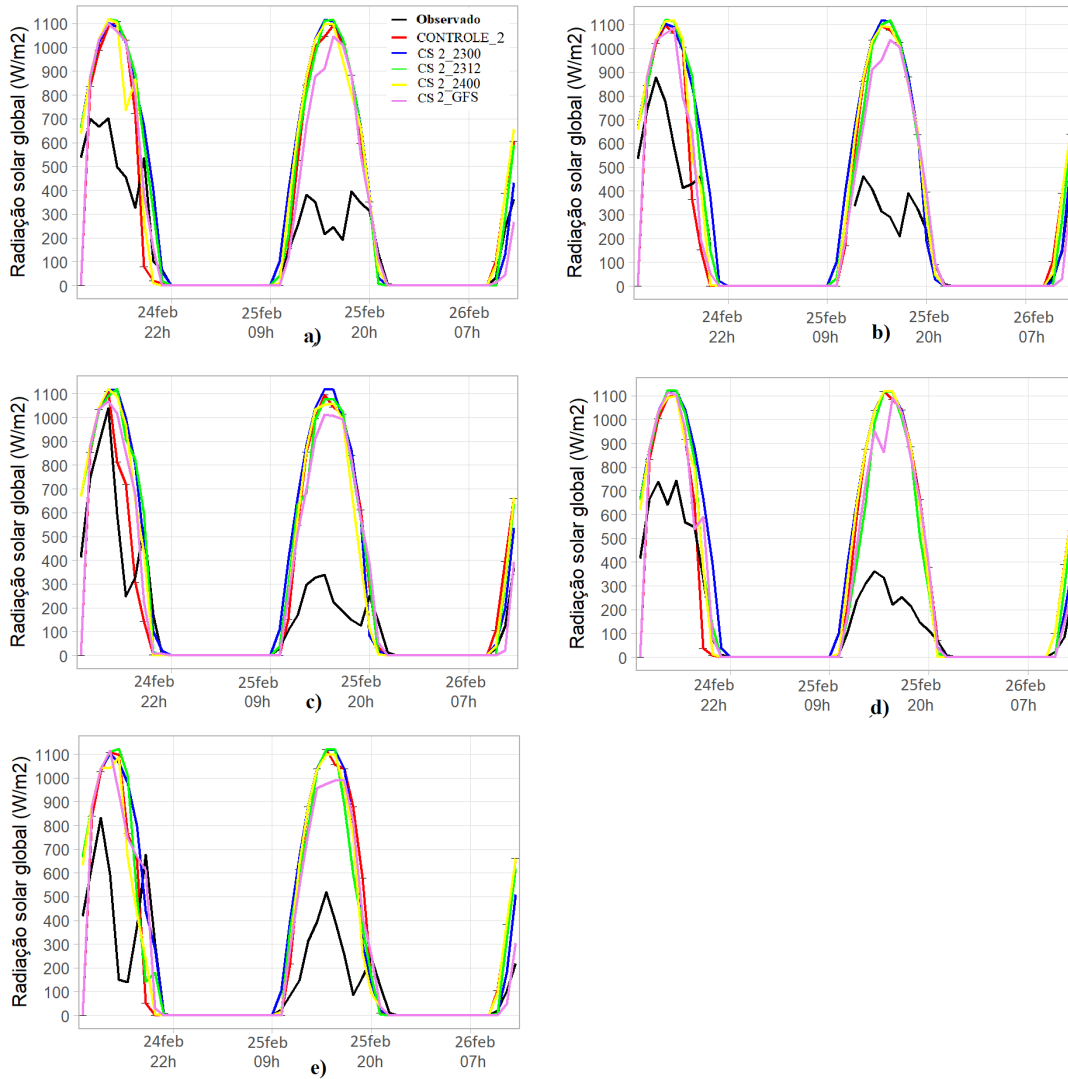
Para a variável radiação solar global em superfície se observa que todas as simulações aqui analisadas, incluindo a associada ao CONTROLE_2, tiveram o mesmo comportamento (Figura 4.31). Os dois máximos simulados superestimaram os valores observados nas estações praticamente na mesma proporção. Para a simulação associada ao CS2_GFS, é possível identificar uma leve diferença em relação às outras simulações no máximo simulado no dia 25 de fevereiro, sendo ligeiramente menor em todas as subáreas. Outra característica que se repete em todas as subáreas é o fato da simulação associada ao CONTROLE_2 ter valores zerados de radiação no dia 24 de fevereiro antes que as outras simulações.

Os valores de EM para esta variável ficaram sempre acima de 110 W/m^2 para todas as subáreas e simulações, indicando a superestimação. Os menores valores de EM foram obtidos para a simulação inicializada com GFS. O CC ficou acima de 0,70 em todas as subáreas e simulações. Em quase a totalidade das subáreas para as simulações inicializadas com ERA5 em horários diferentes ao CONTROLE_2, os valores de REQM ficaram acima de 300 W/m^2 . Para a simulação inicializada com GFS, os valores de REQM ficaram abaixo de 300 sendo melhor que o CONTROLE_2 para esta variável.

Tabela 4.8 - Índices estatísticos calculados considerando as simulações com domínio de 1 km, dos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2400 e CS2_GFS, correspondentes ao caso de estudo 02. Foram consideradas para o cálculo dos índices os resultados obtidos entre as 12:00 UTC do dia 24/02/2017 e 12:00 UTC do dia 26/02/2017. Os números destacados em vermelho e azul indicam o melhor e pior valor do índice REQM respectivamente para cada variável e cada conjunto de simulação.

Domínio de 1km correspondente ao CS2_2300												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	170,70	318,06	0,76	-1,67	3,39	0,80	2,26	10,30	0,78	-0,35	1,03	0,67
2	200,59	335,24	0,78	-1,90	4,58	0,74	0,51	11,93	0,80	-0,53	0,95	0,50
3	163,00	326,19	0,75	-1,84	4,39	0,74	-2,29	12,02	0,79	0,23	0,75	0,57
4	186,39	317,71	0,77	-1,90	4,21	0,78	2,95	11,35	0,84	-0,42	1,03	0,50
5	177,70	340,73	0,71	-2,38	4,89	0,65	4,27	13,86	0,70	-0,67	1,16	0,47
6	-	-	-	-1,52	2,80	0,87	-7,79	13,53	0,68	0,87	1,49	0,35
Domínio de 1km correspondente ao CS2_2312												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	165,26	313,10	0,76	-1,65	3,09	0,82	5,11	9,40	0,83	-0,46	1,08	0,63
2	192,51	326,50	0,78	-2,00	4,10	0,77	2,79	10,97	0,83	-0,53	1,03	0,47
3	157,25	308,21	0,77	-1,65	3,83	0,78	-0,64	10,04	0,85	0,19	0,89	0,31
4	155,56	288,62	0,80	-2,11	3,82	0,80	6,17	11,47	0,83	-0,47	1,21	0,37
5	158,28	331,99	0,71	-2,38	4,58	0,66	6,45	14,61	0,68	-0,69	1,23	0,45
6	-	-	-	-1,39	2,56	0,88	-5,12	11,48	0,72	0,57	1,24	0,48
Domínio de 1km correspondente ao CS2_2400												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	153,40	304,13	0,77	-1,85	3,18	0,80	4,50	11,36	0,75	-0,60	1,04	0,68
2	188,14	326,47	0,78	-2,37	4,17	0,75	3,16	13,47	0,74	-0,49	0,93	0,46
3	143,80	300,37	0,78	-2,20	3,81	0,77	0,07	12,04	0,74	0,27	0,96	0,28
4	172,13	308,37	0,78	-2,49	4,07	0,77	6,73	14,48	0,73	-0,29	1,12	0,40
5	151,10	323,08	0,72	-2,68	4,31	0,68	7,16	14,20	0,67	-0,68	1,17	0,45
6	-	-	-	-1,66	2,64	0,85	-4,73	10,24	0,74	0,29	1,25	0,44
Domínio de 1km correspondente ao CS2_GFS												
Subárea\Variável	Radiação Solar Global (W/m ²)			Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Velocidade do Vento (m/s)		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
1	111,50	286,64	0,77	-2,17	3,08	0,83	7,02	10,86	0,78	-0,50	1,24	0,47
2	124,59	298,02	0,80	-2,32	3,83	0,78	4,49	11,67	0,79	-0,46	1,12	0,31
3	113,26	287,60	0,78	-1,89	3,46	0,79	0,30	11,19	0,76	0,31	0,94	0,29
4	132,48	280,09	0,80	-2,42	3,94	0,78	7,39	14,19	0,74	-0,26	1,14	0,34
5	131,56	296,63	0,76	-2,44	3,87	0,71	7,90	13,62	0,68	-0,60	1,19	0,41
6	-	-	-	-1,36	2,42	0,87	-4,86	11,05	0,74	0,13	1,26	0,37

Figura 4.31 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável radiação solar global em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados observados) em análise para o caso de estudo 02. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_2312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5.

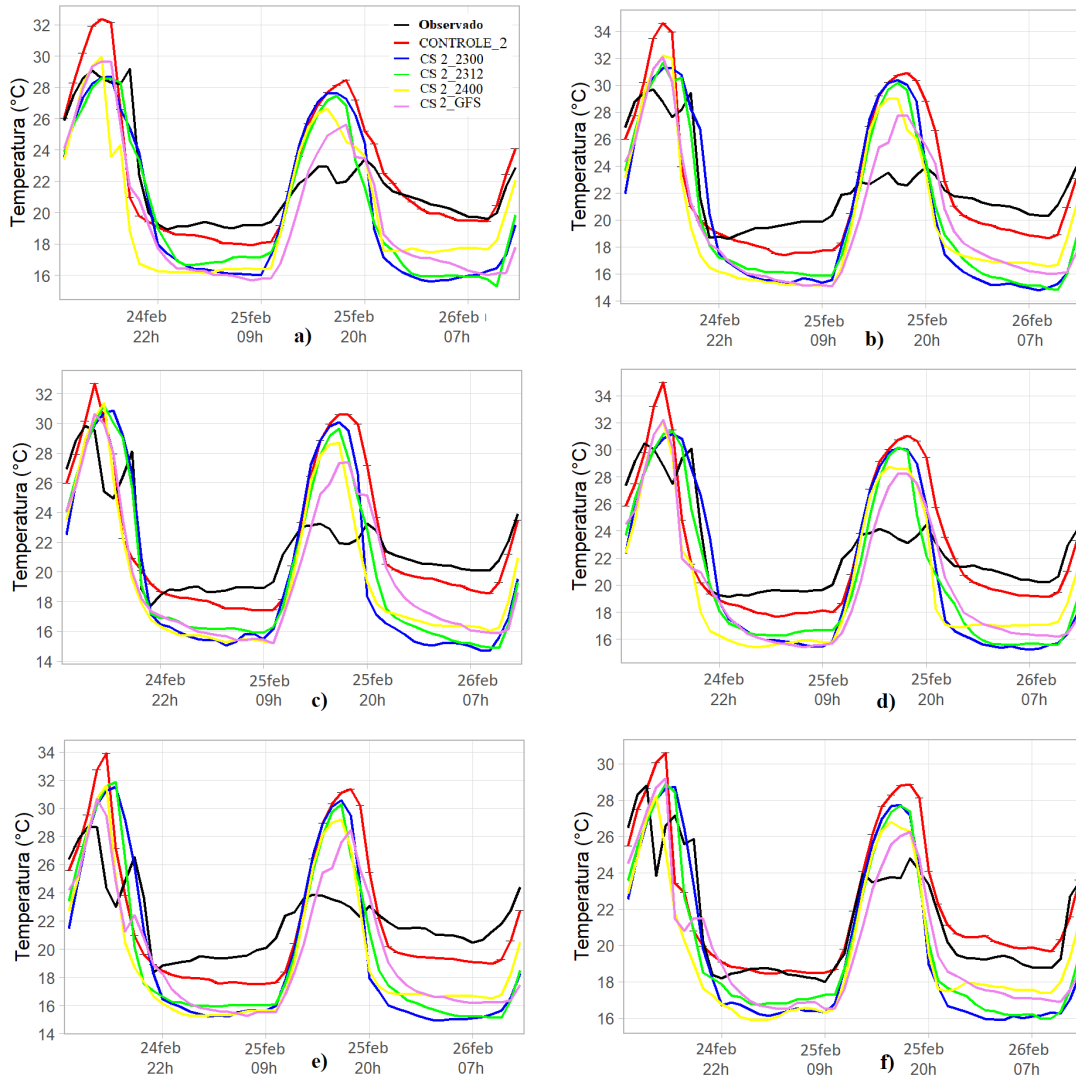


Fonte: Produção do autor.

Para a variável temperatura são observados características bem claras que mostram as diferenças entre o CONTROLE_2 e as simulações aqui em análise. Os máximos relativos dos dias 24 e 25 de fevereiro para o CONTROLE2 foram maiores que os previstos nas outras simulações em todas as subáreas (Figura 4.32). Nesses horários a superestimação do CONTROLE_2 foi maior. O contrário acontece nos horários de valores mínimos, onde a subestimação das simulações inicializadas em horários diferentes do CONTROLE_2, e a que utiliza dados do GFS como condições iniciais e de contorno, mostram uma maior subestimação. Em todas as subáreas se observa também que no período de máximos valores de temperatura, no dia 25 de fevereiro, a simulação associada ao CS2_GFS apresenta os menores valores.

Os valores de EM indicam subestimação em todas as subáreas e todas as simulações em análises diferentes do CONTROLE_2 (Tabela 4.8). Os valores do índice REQM ficaram, no geral, maiores quando comparados aos observados no CONTROLE_2. A subárea 6 foi a que sempre teve melhores resultados para esta variável, destacando que o REQM associado a esta subárea foi o de menor valor em todas as simulações analisadas. Já a subárea 5 apresentou os piores resultados de forma geral. Os valores de coeficiente de correlação foram satisfatórios em todas as subáreas e simulações, ficando sempre acima de 0,70. No entanto, só no CONTROLE_2 que o CC teve valores acima de 0,8 em 5 das subáreas (a subárea 5 teve um CC menor, igual a 0,76).

Figura 4.32 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados da temperatura do JULES em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_02312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.



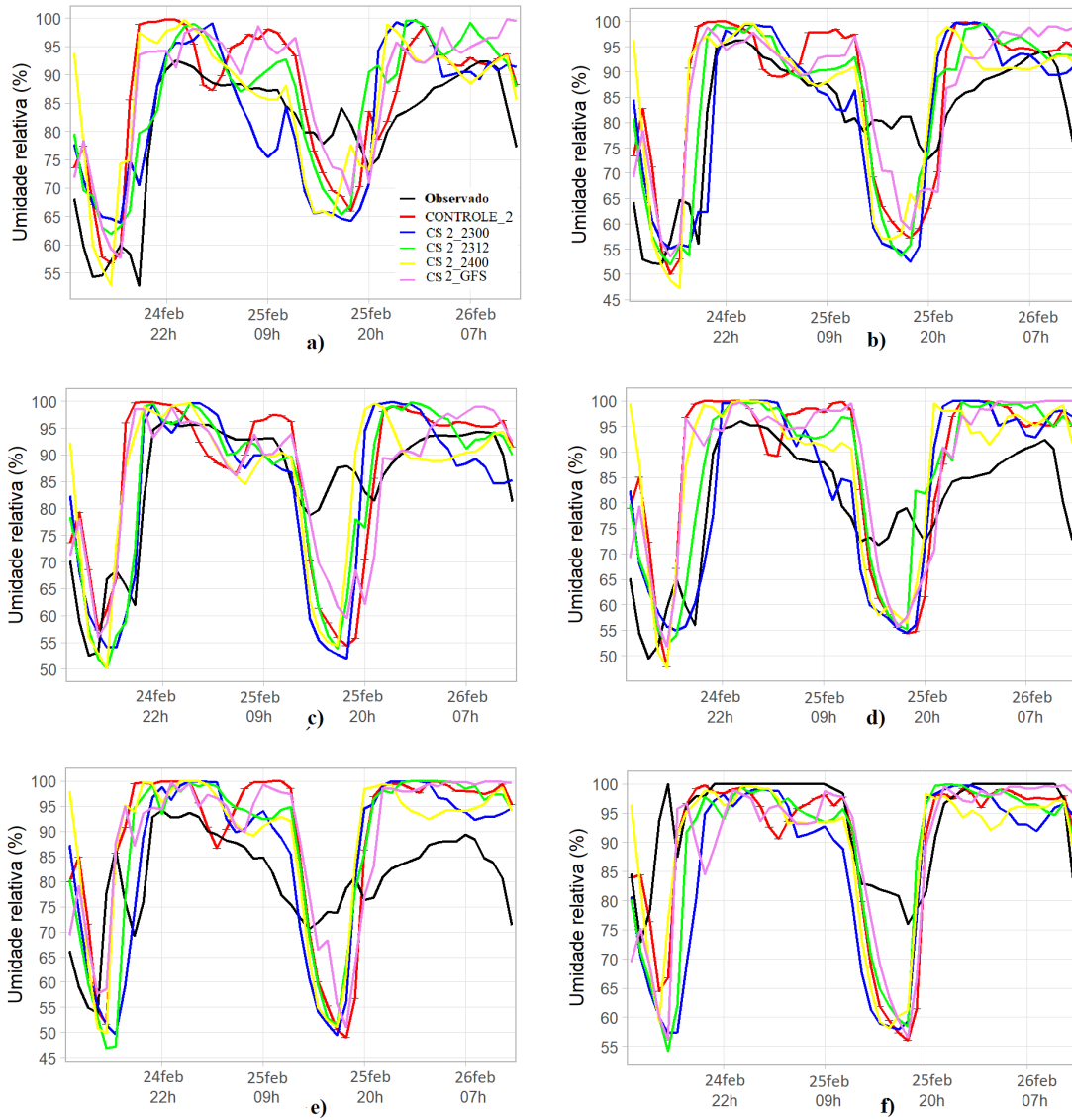
Fonte: Produção do autor.

Para a variável umidade relativa, apesar de diferenças pontuais, se observam semelhanças na previsão quando são comparadas todas as simulações associadas aos CS em análise, incluindo a vinculada ao CONTROLE_2 (Figura 4.33). As características comuns nos dados de umidade relativa previstas pelo BRAMS-JULES nas diferentes simulações são: dois momentos de valores mínimos relativos, um no dia 24 e outro no dia 25, e altos valores durante a noite e começo da manhã. Assim como no CONTROLE_2, em todas as outras simulações se observa que durante os momentos de mínimas no geral se subestima, e durante os momentos de máxima majoritariamente se superestimam os valores, isso quando comparados com os dados observados. Essa situação é percebida em todas as subáreas, com exceção da 6, onde a subestimação está presente na maior parte do período de análise, pois os dados observados nas estações são maiores que os registrados nas outras subáreas. Outra característica que pode ser identificada é que durante a tarde do dia 24 a simulação associada ao CONTROLE_2 foi sempre das primeiras a inverter a tendência de diminuição em todas as subáreas, passando a aumentar de forma brusca. O pior desempenho do modelo em todas as simulações aqui tratadas para a variável umidade relativa ocorreu durante o final da manhã e a tarde do dia 25, onde a subestimação é maior.

Os valores do EM indicam que em geral se produz uma superestimação dos valores de umidade em todas as simulações e subáreas, exceto a subárea 6 que, como mencionado anteriormente, sempre subestimou, e também a subárea 3 para as simulações analisadas que são associadas ao CS2_2300 e CS2_2312. O índice REQM sempre apresentou os valores mais baixos nas subáreas 1 e 6, e no geral ficaram entre 10 % e 16 %, com a simulação associada ao CS2_2312 como a de menores valores em média entre todas as analisadas incluindo o CONTROLE_2.

O coeficiente de correlação apresentou valores acima de 0,60 em todas as subáreas e simulações. Os piores valores para este índice foram sempre associados à subárea 5. Novamente, os maiores valores em média, agora para o CC, foram obtidos para a simulação associada ao CS2_2312, ficando acima de 0,8 nas subáreas da 1 à 4.

Figura 4.33 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável umidade relativa em todas as subáreas em análise para o caso de estudo 02. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_02312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa). a) Subárea 1, b) subárea 2, c) subárea 3, d) subárea 4, e) subárea 5, f) subárea 6.

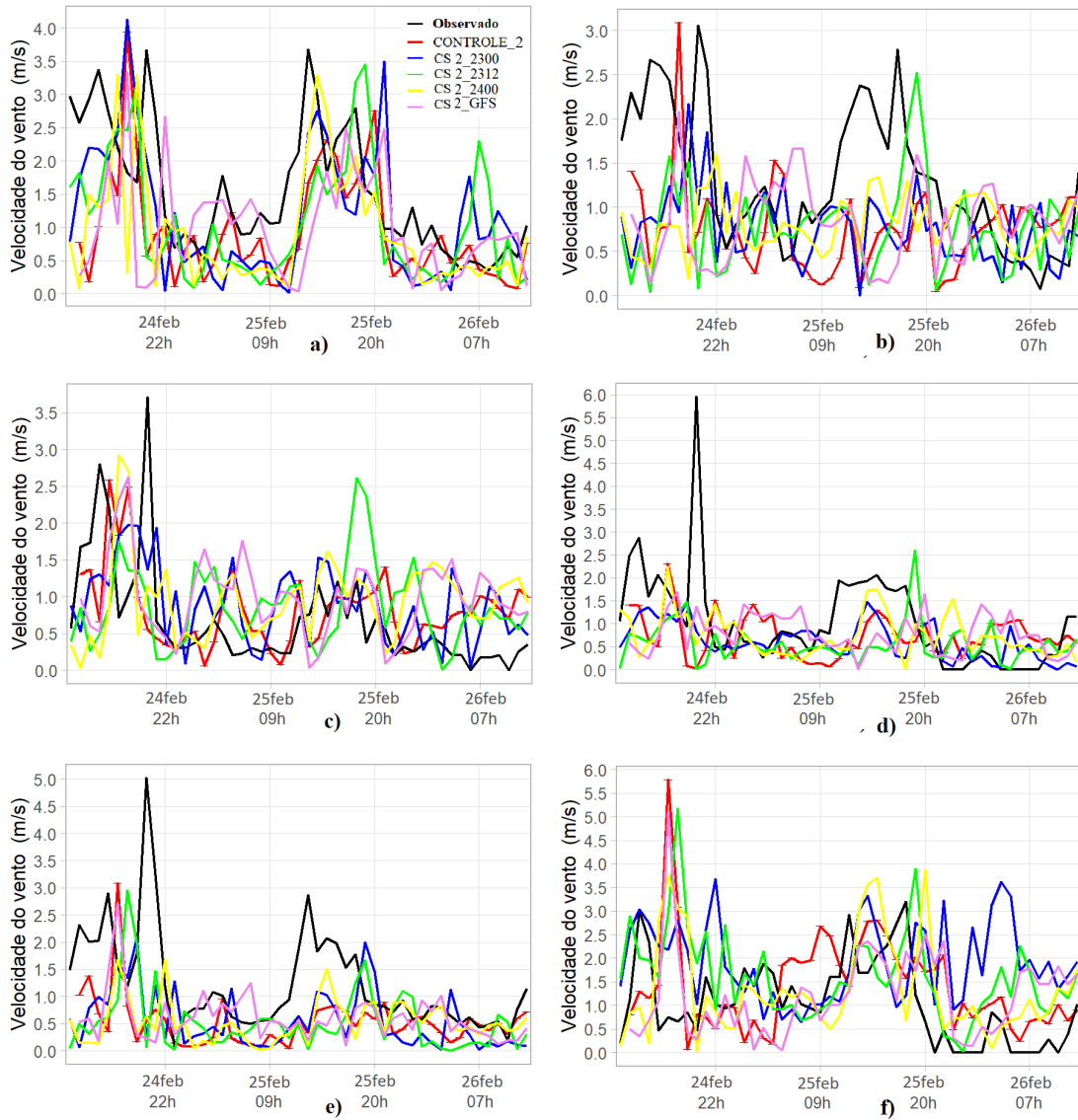


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.34 é apresentada a velocidade do vento média horária observada e simulada nas seis subáreas e para todo o período de integração do modelo. A análise visual é difícil para esta variável, sendo possível identificar poucas características específicas de cada simulação em estudo. De forma geral, existe pouca dispersão entre os dados previstos pelas simulações, incluindo a associada ao CONTROLE_2, em cada hora. A tendência em aumentar ou diminuir coincide na maior parte do tempo em todas as subáreas, a magnitude desse aumento ou diminuição é o que difere com maior frequência. Um exemplo dessa situação é observado claramente durante a noite do dia 25 de fevereiro, quando uma tendência ao aumento de velocidade do vento, a simulação associada ao CS2_2312 é a que, com exceção da subárea 5, alcança sempre os maiores valores.

O índice EM indica subestimação nas subáreas 1, 2, 4 e 5, e superestimação nas subáreas 3 e 6 considerando as médias em todo o período, para todas as simulações, incluindo a associada ao CONTROLE_2. O índice REQM teve valores semelhantes em todas as simulações e o pior valor sempre foi associado à subárea 6. Os melhores valores de REQM foram para a subárea 3, tanto na simulação do CONTROLE_2 como nas outras em análise aqui, com exceção da associada ao CS2_2412 que teve o melhor valor de REQM na subárea 2. O coeficiente de correlação teve os valores mais baixos para esta variável em comparação com as outras analisadas. Em todas as subáreas e simulações o CC ficou abaixo de 0,70. A subárea 1 teve os mais altos valores de CC em todos os casos. Não são identificadas diferenças notáveis para esta variável na comparação entre as simulações ao se analisar os valores dos índices estatísticos.

Figura 4.34 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável velocidade do vento do JULES em 10 m, e em todas as subáreas (exceto área 6 por falta de dados para a variável) em análise para o caso de estudo 1. Dados para as simulações com resolução de 1km de resolução espacial pertencentes aos CS2_2300 (cor azul), CS2_2312 (cor verde), CS2_2400 (cor amarela), CS2_GFS (cor roxa).



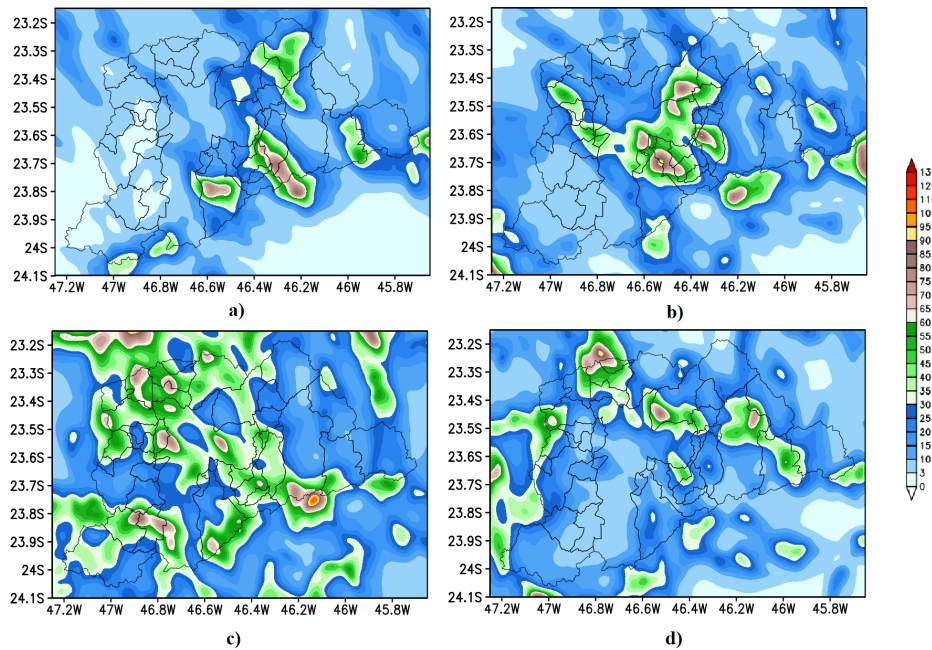
Fonte: Produção do autor.

Precipitação

Na Figura 4.35, são apresentadas as distribuições da precipitação total acumulada prevista pelo BRAMS-JULES sobre a RMSP para o período entre as 15:00 UTC do dia 24/02/2017 e as 00:00 UTC do dia 25/02/2017 nas simulações associadas aos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2412 e CS2_GFS. Nos 4 casos analisados, se observam localidades com valores previstos acima de 60 mm. No geral, a precipitação acumulada prevista pela simulação associada ao CS2_2300 (Figura 4.35a) foi a menor sobre a RMSP entre as 4 analisadas. A precipitação prevista pela simulação associada ao CS2_2400 (Figura 4.35c) foi a maior, e a que apresenta uma distribuição mais semelhante com o CONTROLE_2 do ponto de vista da localização dos máximos. Nesse caso específico, os maiores valores de precipitação foram previstos para várias sub-regiões, mas destaca uma faixa diagonal que vai desde a sub-região Oeste até a Sudeste.

As simulações associadas aos CS2_2300 (Figura 4.35a) e CS2_2312 (Figura 4.35b) previram maiores acumulados, principalmente para as sub-regiões Sudeste e Leste da RMSP. A simulação associada ao CS2_GFS (Figura 4.35d) previu zonas de máxima precipitação sobre parte das sub-regiões Oeste, Norte e Leste, assim como áreas do município de São Paulo. Nos 4 casos analisados, a sub-região Sudeste apresentou altos valores de precipitação total acumulada prevista no período de interesse.

Figura 4.35 - Representação da precipitação total acumulada para a RMPS e áreas próximas no período entre as 15:00 UTC do dia 24/02/2017 e as 00 UTC do dia 25/02/2017. a) Simulação de 1 km CS2_2300, b) Simulação de 1 km CS2_2312, c) Simulação de 1 km CS2_2400, d) Simulação de 1 km CS2_GFS.

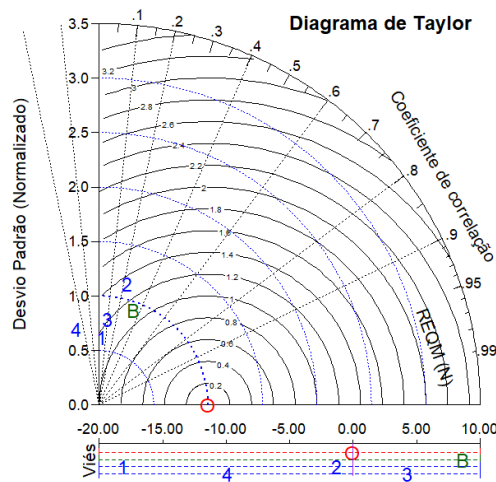


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.36 é apresentado o diagrama de Taylor com a representação dos índices estatísticos obtidos na comparação entre os dados simulados e os observados nos 211 pontos onde se registrou precipitação em superfície neste caso de estudo. Na Tabela 4.8 os mesmo índices sem ser normalizados. As simulações identificadas com os números 1 e 4, associadas aos CS2_2300 e CS2_GFS, respectivamente, foram as que apresentaram piores resultados, com os menores valores de coeficiente de correlação e de REQM, como explicitado na Tabela 4.9. Os melhores resultados para todos os índices calculados sempre foram obtidos com a simulação de melhor resolução do CONTROLE_2.

O Viés indica uma superestimação, no geral, da precipitação total acumulada na RMSP na simulação associada ao CS2_2400, nas outras três o índice mostra subestimação. A maior subestimação foi na previsão da simulação associada ao CS2_2300 com um Viés igual a -18,1 mm, na Figura 4.35a é possível ver os menores valores previstos de precipitação para a RMSP, neste caso em comparação com os outros analisados.

Figura 4.36 - Diagrama de Taylor com a representação do coeficiente de correlação, desvio padrão normalizado, raiz do erro quadrático médio normalizado e erro médio para a variável precipitação. No diagrama B-> Simulação para 1 km do CS CONTROLE_2, 1->CS2_2300, 2-> CS2_2312, 3->CS2_2400, 4-> CS2_GFS.



Fonte: Produção do autor.

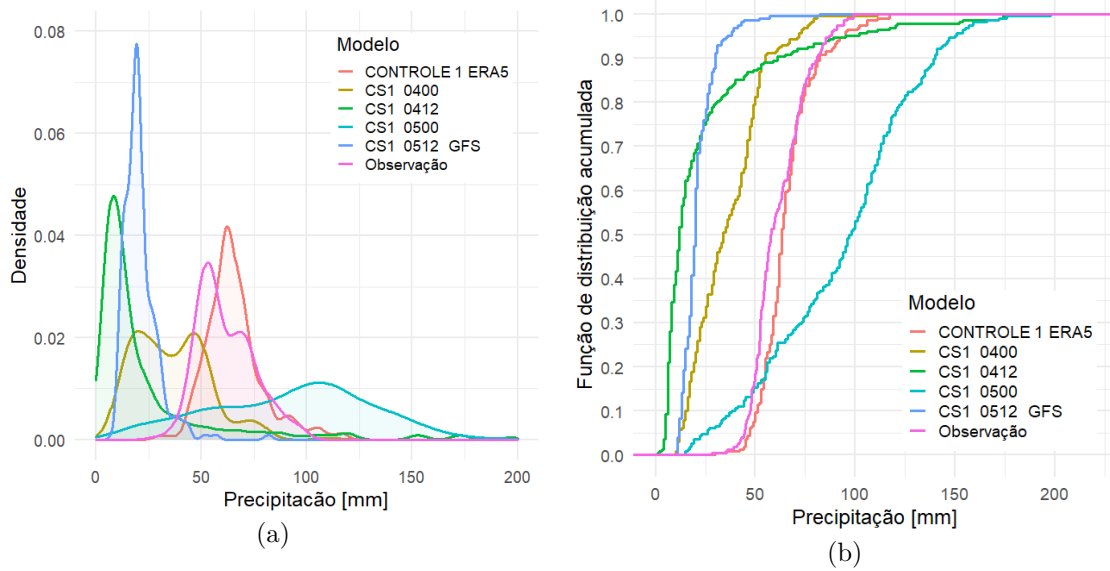
Tabela 4.9 - Valores obtidos para os diferentes índices estatísticos associados às simulações da precipitação acumulada pertencentes aos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2400 e CS2_GFS na comparação com os valores observados.

Dados/Índices	DP	REQM	CC	EM(Viés)
Estações	18,1	0	1	0
BRAMS-JULES CONTROLE2 (B)	16,7	21,8	0,34	8,6
CS2_2300 (1)	11,3	27,6	0,04	-18,1
CS2_2312 (2)	20,6	24,2	0,23	-1,24
CS2_2400 (3)	14,3	22,3	0,10	4,28
CS2_GFS (4)	13,2	27,1	-0,28	-9,84

As curvas de densidade associadas aos acumulados totais registrados, em cada ponto onde também foi registrada a variável nas estações e pluviômetros em superfície, são mostradas na Figura 4.37(a) para todas as simulações analisadas e os dados observados. Na Figura 4.37(b) se apresenta a função de distribuição acumulada para os mesmos dados. Para as simulações associadas aos CS2_2300 e CS2_GFS, um número maior de valores previstos para a precipitação total acumulada nos pontos em superfície ficou abaixo de 25 mm, sendo aproximadamente 90 % e 73 % do total de registros nesse intervalo, respectivamente. Os dados observados nas estações em superfície apresentaram aproximadamente 50 % dos registros de precipitação total acumulada abaixo de 25 mm, o que explica a grande subestimação das simulações mencionadas anteriormente.

Na análise da densidade, as curvas correspondentes aos valores previstos pelas simulações associadas aos CS2_2312 e CS2_2400, tiveram maior semelhança com a dos dados observados. A primeira simulação com um intervalo mais amplo de registros e a segunda com um intervalo menor refletiu nos valores de desvio padrão, 20,6 mm e 14,3 mm, respectivamente. A subestimação geral da simulação associada ao CS2_2312 resulta de um maior número de dados previstos de precipitação entre 0 e 25 mm, em comparação com os dados observados. O contrário acontece para a simulação associada ao CS2_2400, uma superestimação total por um maior número de dados previstos acima de 25 mm em relação com os observados em superfície.

Figura 4.37 - Representação dos acumulados de precipitação associados às simulações pertencentes aos CS2_2300, CS2_2312, CS2_2400 e CS2_GFS. (a) Densidade de acumulados totais de precipitação, (b) Função de distribuição acumulada para os dados de precipitação total.



Fonte: Produção do autor.

5 IMPACTOS DAS MUDANÇAS NA CONCENTRAÇÃO E NAS PROPRIEDADES MICROFÍSICAS DOS AEROSSÓIS E NA COBERTURA DA SUPERFÍCIE NA PRECIPITAÇÃO. ANÁLISE DOS CASOS DE ESTUDO NA RMSP.

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise dos testes de sensibilidade realizados considerando as mudanças na concentração e nas propriedades microfísicas dos aerossóis, empregados na microfísica de nuvens, tanto os higroscópicos como os não higroscópicos, e a alteração na cobertura da superfície na RMSP. As simulações aqui analisadas são descritas na Tabela 3.9 e compreendem seis experimentos em que as mudanças são unicamente nos aerossóis e dois outros onde se foca em alterações da superfície do domínio do modelo, isso para cada um dos dois casos de estudos tratados nesta pesquisa. A comparação é feita utilizando como referência o domínio de 1 km de resolução espacial dos conjuntos de simulações CONTROLE, para ambos casos de estudo. Neste capítulo, qualquer menção ao CONTROLE, seja do caso de estudo 01 ou 02, deverá ser entendida como ao domínio de maior resolução dentro desse CS, caso contrário será especificado.

5.1 Caso de estudo 01: Análise dos Testes de Sensibilidade.

5.1.1 Efeitos na Precipitação. Caso de estudo 01

Nas Figuras 5.1 e 5.2 estão representados os efeitos principais nas características qualitativas e quantitativas da precipitação total acumulada no período de estudo causados pelas mudanças nas propriedades dos aerossóis e da superfície. No geral, em todas as simulações de sensibilidade, a distribuição espacial da precipitação mantém o padrão encontrado no CONTROLE_1 uma região de máximo acumulado sobre o noroeste da RMSP que se estende pelo Norte e interior do município de São Paulo. Outrossim, áreas de menores acumulados são encontradas nas sub-regiões Leste e Sudoeste da RSMP.

Podem ser identificadas áreas onde as diferenças em relação ao CONTROLE_1 estão sempre presentes e em maior medida, exemplo é a porção entre as latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8, onde majoritariamente se observa uma diminuição da precipitação em todas as simulações em relação à referência. Outra área que mostra sempre superestimação é a localizada sobre o norte do município de São Paulo e inclui partes da sub-regiões Norte e Leste da RMSP (aproximadamente entre as latitudes -23,5 e -23,2 e longitudes -46,8 e -46,3). No extremo sudeste do subdomínio em análise se observa majoritariamente um aumento da precipitação total acumulada nos testes de sensibilidade em relação com o CONTROLE_1.

Ao analisar a sensibilidade ao aumento e à diminuição do total de aerossóis na atmosfera, ver simulações S1_1 e S1_2 na Figura 5.2, vemos que em ambos casos a região de menor precipitação em relação a referência está no noroeste do subdomínio. No entanto, os valores são menores no caso em que os aerossóis estão presentes em menor concentração, alcançando na S1_2 uma subestimação de até 40 mm no extremo do subdomínio. Ao norte do município de São Paulo e na sub-região Norte valores superestimados de precipitação foram obtidos em ambas simulações, já para o norte da sub-região Leste o S1_1 resultou em uma superestimação enquanto ao S1_2 produziu subestimação, isso em relação ao CONTROLE. Na porção sul da RMSP e sobre o litoral, a tendência em ambas simulações foi a de superestimar a precipitação, com valores maiores na S1_2. Sobre o sul da sub-região Sudoeste, principalmente sobre o município de São Lourenço da Serra, valores superestimados foram obtidos para a simulação S1_2, enquanto S1_1 subestimou a precipitação. Na Figura 5.1 essas diferenças ficam evidentes principalmente na metade sul do subdomínio, onde áreas maiores com precipitação total acima de 60 mm são observadas na S1_2 em relação a S1_1.

Considerando as simulações que tiveram unicamente mudanças nos aerossóis não higroscópicos, S1_3 e S1_4, se observa que a subestimação no noroeste do subdomínio é bem maior no primeiro caso em relação ao CONTROLE. Como foi visto anteriormente, os valores para a S1_3 de até -50 mm foram os mais significativos se considerarmos a comparação entre todas as simulações de teste e o CONTROLE_1. O aumento dos *ice friendly* provocou uma diminuição importante da precipitação na região de maior acumulado para o subdomínio em análise que abrange a RMSP. Enquanto a diminuição dos aerossóis não higroscópicos (S1_4) provocou uma superestimação na maior parte do subdomínio, a situação contrária aconteceu quando se aumentaram os aerossóis higroscópicos (S1_3) (Figura 5.2). As principais diferenças entre estas duas simulações estão na metade leste do subdomínio analisado.

Na Figura 5.1 se pode observar que, para alguns municípios na sub-região Leste da RMSP, as diferenças na precipitação no ponto tomado como referência chegam a mais de 10 mm.

A comparação entre as simulações com mudanças exclusivamente nas concentrações dos aerossóis higroscópicos (S1_5 e S1_6) mostra uma situação quase contrária ao caso anterior. Enquanto o aumento dos aerossóis *water friendly* provocou superestimação na maior parte da RMSP, a diminuição deste tipo de aerossol levou a uma subestimação da precipitação em relação ao CONTROLE_1. A região com subestimação no noroeste do domínio se mantém em ambos casos, sendo mais intensa para a S1_6. Na porção sul do subdomínio domina a superestimação em relação ao controle em ambas simulações, principalmente sobre a região da serra e no litoral. Já nas sub-regiões Leste, Sudeste, Oeste e Sul da capital, dentro da RMSP, o aumento de aerossóis higroscópicos provocou, em geral, superestimação da precipitação, enquanto a diminuição provocou subestimação.

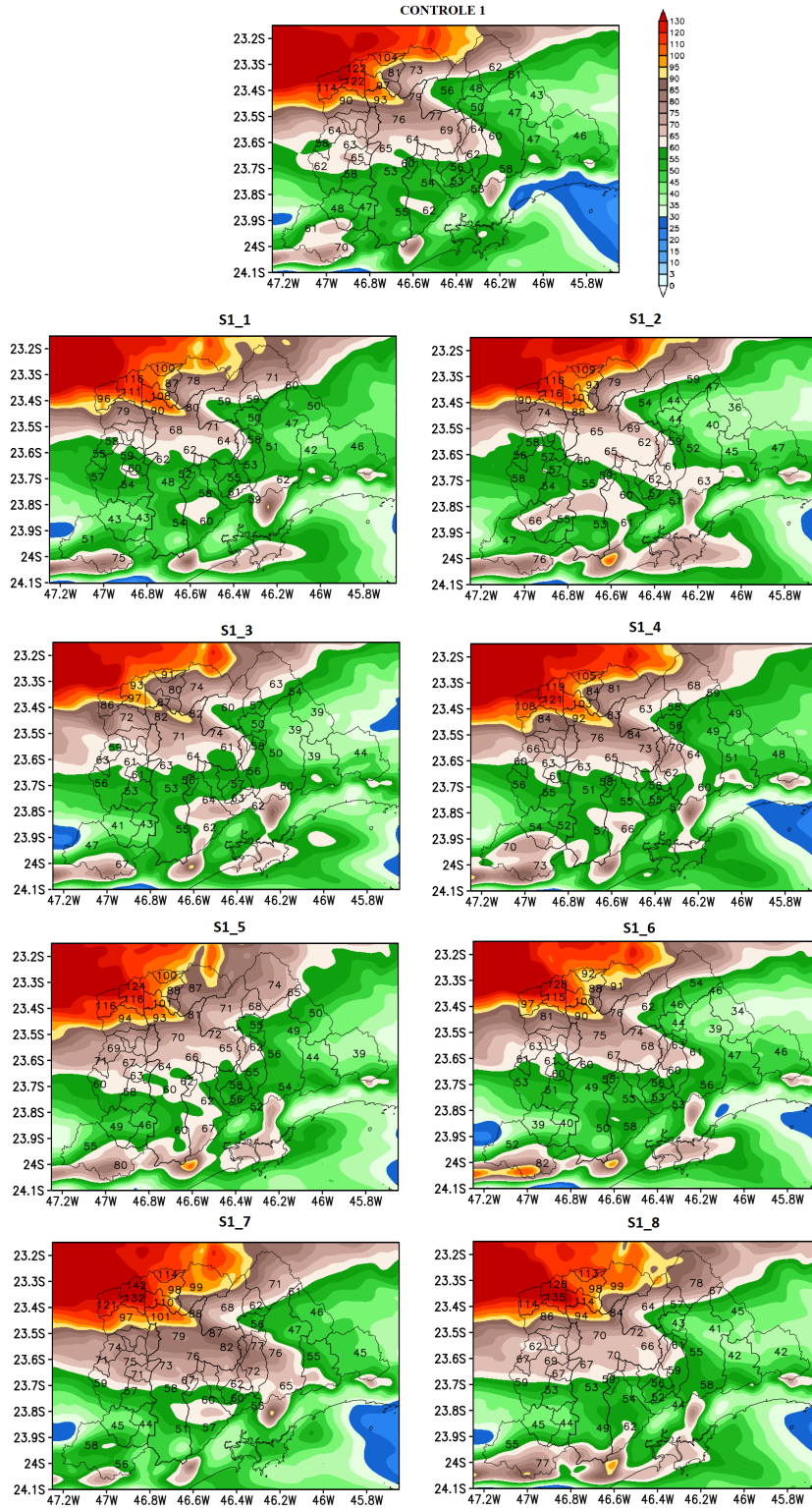
Ao considerar as simulações onde o teste consiste no aumento das concentrações de ambos tipos de aerossóis tratados (S1_3 e S1_5), se encontra que os aerossóis higroscópicos em maior concentração contribuíram em maior medida com a superestimação na região em análise. A região de subestimação no noroeste do domínio ficou menor na S1_5, e maiores valores de superestimação foram obtidos para a porção sul do subdomínio, e também para o norte da sub-região Leste e a sub-região Norte da RMSP. A comparação entre as estimativas de precipitação para as simulações onde exclusivamente se diminuiu as concentrações dos aerossóis tratados (S1_4 e S1_6), mostra que menor concentração dos *ice friendly* causaram principalmente superestimação da precipitação em relação ao CONTROLE. A diminuição na mesma medida dos *water friendly*, em geral, levou à subestimação, incluindo uma região maior com valores subestimados abaixo de -20 mm no noroeste no subdomínio analisado.

Na simulação S1_7, a substituição da mancha urbana pela vegetação predominante na região teve como efeito dominante a superestimação da precipitação na RMSP em relação com o CONTROLE_1. Só em parte da sub-região Sudoeste que se observou uma subestimação. Os maiores valores foram registrados no centro e norte do município de São Paulo, precisamente onde a mancha urbana é mais significativa, e também na sub-região Norte onde valores superestimados acima de 20 mm foram estimados. A região de máxima subestimação, observada nas restantes simulações a noroeste do subdomínio que abrange a RMSP, ficou diluída na S1_7, com a maior parte da área apresentando superestimação.

A simulação S1_8 que teve as maiores mudanças entre todas as analisadas, com substituição da mancha urbana pela vegetação nativa e diminuição de ambos tipos de aerossóis, mostra regiões de superestimação na faixa sul do subdomínio e também na porção norte da RMSP. Ao comparar com o caso em que só se modificou a superfície (S1_7), se observa que a região de máxima superestimação ao norte da RMSP se mantém na S1_8, com valores acima de 20 mm, no entanto, reaparecem valores expressivos de subestimação na porção noroeste do subdomínio. Por outro lado, aumentaram as áreas de subestimação na S1_8, principalmente nas sub-regiões Leste e Sudeste. Pode-se dizer que, com as características de superfície sem mancha urbana, a diminuição dos aerossóis provocou mudanças significativas, tendendo principalmente à diminuição da precipitação em relação ao CONTROLE. Se a comparação é feita com a S1_2, onde as diferenças entre elas estão exclusivamente na superfície, sendo que na S1_2 está presente a mancha urbana e na S1_8 a vegetação nativa, com valores de aerossóis totais reduzidos na mesma medida, os resultados mostram que a introdução da superfície vegetada contribuiu principalmente para a intensificação da superestimação na faixa norte da RMSP. Assim, considerando estas simulações e para este caso de estudo, pode se estabelecer como principal resultado que, a superfície vegetada teve maior peso no aumento da precipitação na faixa norte da RMSP enquanto a diminuição dos aerossóis atuou para a subestimação encontrada no centro e sul da sub-região Leste e em boa parte da Sudeste.

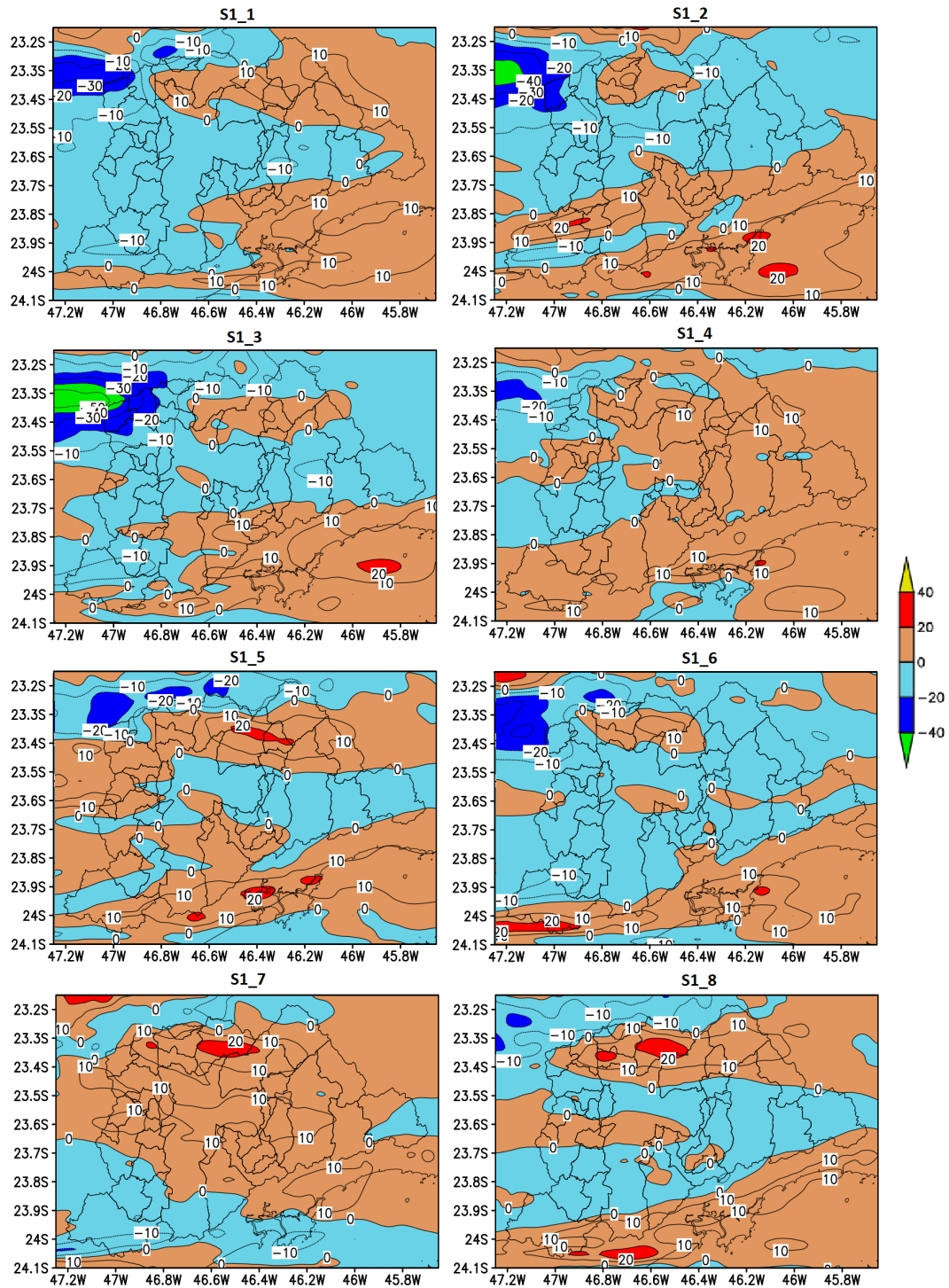
No geral, nas simulações S1_1, S1_2, S1_3 e S1_6 os valores previstos de precipitação para a RMSP foram menores em relação aos estimados pelo CONTROLE_1, enquanto nas simulações S1_4, S1_5 e S1_7 a maior parte teve valores previstos acima do CONTROLE, e na S1_8 o domínio ficou dividido em partes quase iguais.

Figura 5.1 - Representação espacial da precipitação prevista pelo CONTROLE e pelos testes de sensibilidade (S1_1, S1_2, S1_3, S1_4, S1_5, S1_6, S1_7, S1_8) correspondentes ao Caso de Estudo 01. Os números indicam acumulados totais no período de estudo sobre os pontos onde eles se encontram.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.2 - Caso de estudo 01: Representação espacial das diferenças entre a precipitação total acumulada no período de estudo pelos testes de sensibilidade e o CONTROLE_1, subdomínio que abrange a RMSP.



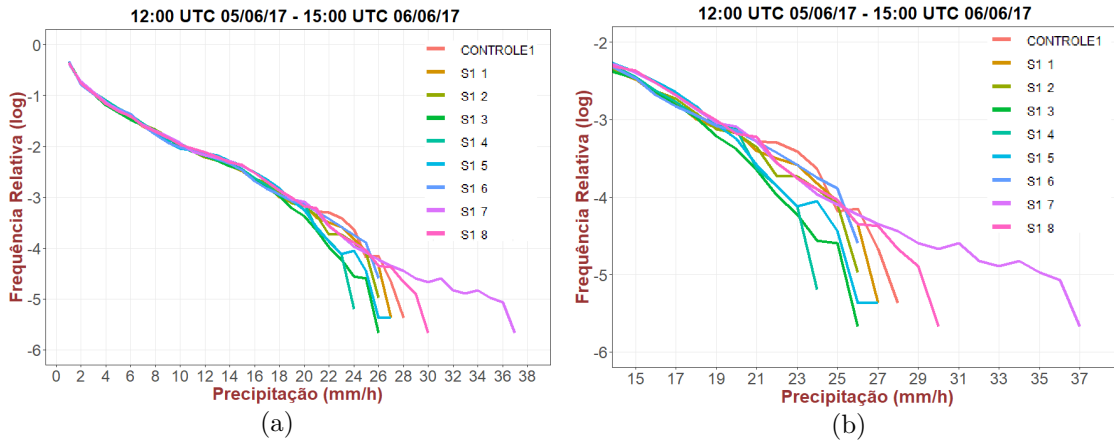
Fonte: Produção do autor.

Além da distribuição espacial da representação da precipitação e das diferenças em relação ao CONTROLE_1, também foi analisada a variação na intensidade da chuva em cada teste de sensibilidade. Para isso se obteve informação sobre a precipitação em cada um dos nodos do subdomínio que inclui a RMSP (Figura 3.22) para cada hora dentro do período de tempo severo na região. Os dados foram comparados entre eles e com os obtidos para o CONTROLE_1. Na Figura 5.3 se mostram os resultados, para cada simulação em análises do caso de estudo 01, da frequência relativa calculada com essa informação de acumulados de precipitação. É possível observar que, considerando todas as simulações, foram obtidos valores de intensidade entre 0 e 37 mm/h. Para o caso do CONTROLE_1 esse intervalo é menor, entre 0 e 28 mm/h, de acordo com resultados observados em estações em superfície vistos no Item 3.3.1.

Na Figura 5.3(a) se observa que existe uma convergência nos valores de frequência relativa calculados para o intervalo entre 0 e 15 mm/h, com poucas diferenças entre as simulações testes e entre elas e o CONTROLE_1. Um elevado número de registros fica dentro desse intervalo. As principais diferenças estão no intervalo acima de 15 mm/h como apresentado na Figura 5.3(b), e principalmente a partir de 19 mm/h quando as curvas associadas a cada simulação começam a ficar mais separadas. Em relação ao CONTROLE_1, que teve valores de intensidade de precipitação em alguns nodos até 28 mm/h, só as simulações com mudanças na superfície (S1_8 e S1_9) tiveram valores de intensidades de precipitação maiores, chegando a 30 mm/h, na S1_8, e até 39 mm/h na S1_7. Nestes testes se observa que ao assumir a cobertura da superfície da RMSP como vegetação nativa nas simulações, aumenta a intensidade máxima estimada de precipitação. No entanto, com a diminuição dos aerossóis totais da microfísica, e mantendo a superfície urbana, a máxima intensidade também diminui, mesmo que ainda ficando maior que a máxima do controle.

Nas simulações com mudanças unicamente nos aerossóis, os valores pontuais de intensidade de precipitação ficaram abaixo de 28 mm/h, sendo a S1_4, que teve o aerossol *ice-friendly* diminuído em 30 %, a que apresentou o menor valor, com intensidade de até 24 mm/h. Os testes de sensibilidade S1_1, com aumento em ambos tipos de aerossóis, e S1_5, com aumento unicamente dos aerossóis *water-friendly*, foram os que alcançaram valores pontuais de precipitação mais próximos do controle, com até 27 mm/h. Na simulação S1_6, estimou valores de intensidade de precipitação de até 26 mm/h, no entanto o valor da frequência relativa indica que um número maior de nodos registrou esses valores altos de intensidade quando comparado com as outras simulação, com exceção da S1_1.

Figura 5.3 - Gráficos de frequência relativa (em escala logarítmica) associados aos dados de intensidade de precipitação em cada nodo correspondente ao subdomínio que abrange a RMSP e em cada hora do período de estudo. Caso de estudo 01. (a) Valores de precipitação entre 0 e 38 mm/h, (b) valores de precipitação entre 15 e 38 mm/h.



Fonte: Produção do autor.

Ao calcular a quantidade de nodos onde a intensidade de precipitação ficou acima de 15 mm/h, considerando todas as horas no período de duração do evento severo, foram obtidos resultados semelhantes à análise anterior, como é apresentado na Figura 5.4. As barras laranjas indicam a porcentagem, em relação ao CONTROLE_1, de pontos onde se manifestou a característica descrita anteriormente. Temos então que as simulações da S1_1 à S1_4 tiveram menor número de pontos com intensidade acima de 15 mm/h, isso em relação à referência. A S1_3, que teve mudanças unicamente nos *ice friendly* (aumento), foi a que teve o menor valor entre todas, com um total de nodos com registros intensos acima de 15 mm/h que representam aproximadamente 80,6 % do observado no CONTROLE_1. Tanto a S1_3 como as S1_1 e S1_4 tiveram valores abaixo de 90 %. A S1_6 também teve um número menor de nodos com as características mencionadas em relação com o CONTROLE_1.

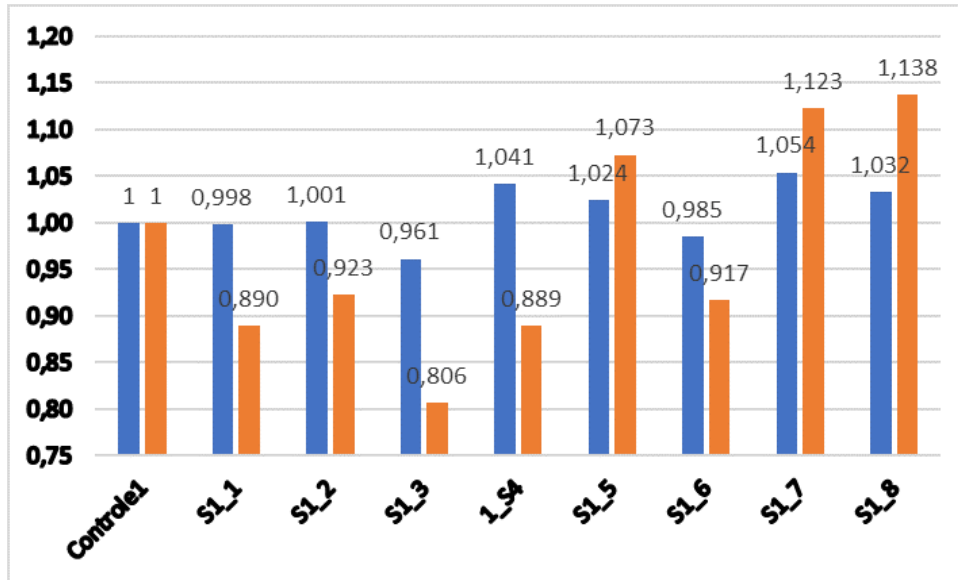
As simulações com mudanças na superfície, S1_7 e S1_8, tiveram um maior número de pontos com intensidade acima de 15 mm/h, o que comprova que neste caso de estudo, ao substituir a superfície urbana por vegetação, a intensidade da precipitação aumenta tanto no seu valor máximo estimado como no número de momentos ou áreas em que se estes valores são registrados. Se observa que na ausência da superfície urbana, a diminuição dos aerossóis provocou uma diminuição no valor máximo de intensidade estimado, mas contribuiu com um aumento de pontos onde valores acima de 15 mm/h foram registrados.

Mudanças nos aerossóis não higroscópicos (S1_3 e S1_4) apresentaram os menores valores de pontos com intensidade acima de 15 mm/h, tanto quando estes foram aumentados como quando foram diminuídos. Quando modificações foram feitas em ambos tipos de aerossóis (S1_1 e S1_2) a tendência foi também de diminuição dos valores. Já quando o teste de sensibilidade foi focado exclusivamente no aumento dos aerossóis higroscópicos (S1_5,) se observou, neste caso de estudo, um aumento dos pontos com intensidade de precipitação acima de 15 mm/h.

Na Figura 5.4 são mostrados também os acumulados total de precipitação observado em todo o período de tempo severo para este caso de estudo sobre o subdomínio que abrange a RMSP em cada um dos testes de sensibilidade. Se observa que, ao considerar toda a região, os acumulados têm diferenças pouco significativas pois regiões onde se estimaram valores acima do tido como referência se contrapõem às regiões com valores menores.

As simulações com variações em ambos tipos de aerossóis apresentaram valores totais de precipitação muito próximos da referência associada ao CONTROLE_1, diferenças menores a 1 %. Já quando as modificações foram nos aerossóis não higroscópicos, um aumento deles contribuiu para diminuição do total de precipitação acumulado em aproximadamente 4 %, de forma análoga ocorre com a diminuição desses aerossóis, que provoca um aumento da precipitação total de 4,1 %. O aumento unicamente dos aerossóis higroscópicos provocou aumento de 2,4 % na precipitação e a diminuição desses aerossóis contribuiu com um acumulado total menor em 1,5 %. As simulações com mudanças na superfície mostraram em ambos casos precipitações totais acumuladas acima do estimado pelo CONTROLE_1, concretizando o já visto até aqui, que indica que a não existência da mancha urbana contribuiu com o aumento da precipitação, tanto em acumulado total como em intensidade.

Figura 5.4 - Histograma incluindo de valores de precipitação acumulada total no subdomínio que abrange a RMSP no período de estudo (barras azuis) e números de nodos do mesmo subdomínio com valores registrados de precipitação horária acima de 15 mm (barras laranjas). Em ambos casos os valores foram normalizados a partir da divisão pelo valor associado ao CONTROLE_1. Dados correspondentes ao caso de estudo 01.



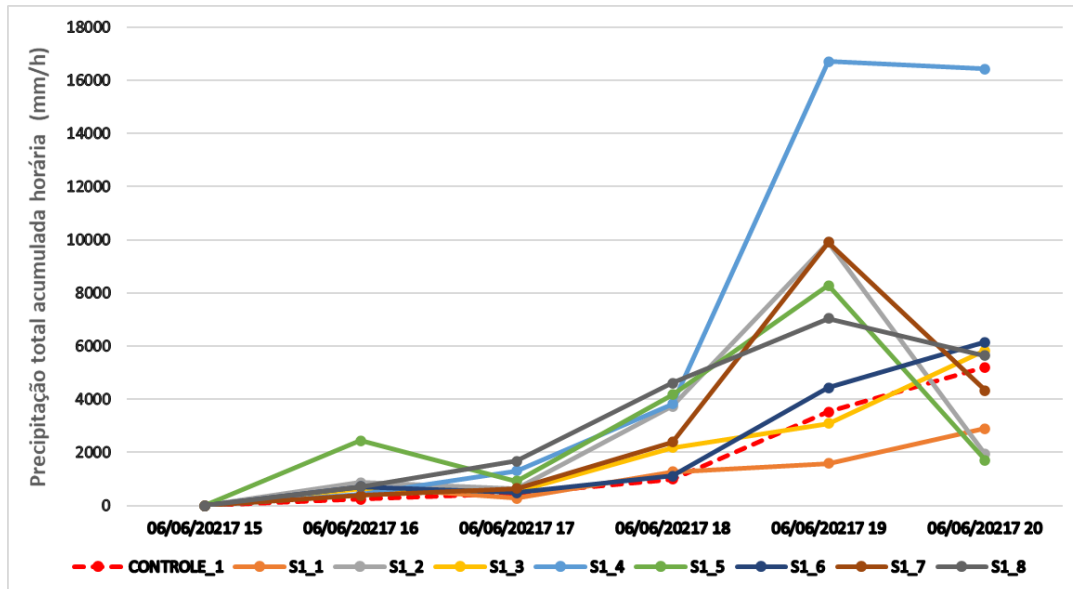
Fonte: Produção do autor.

Para a análise da duração da precipitação depois do período de tempo tido como referência para a ocorrência do evento de precipitação extrema, foi estudada uma área específica que inclui a maior parte da mancha urbana (sinalizada com a cor vermelha na Figura 3.22) durante as cinco horas posteriores ao término do evento. Se calculou para cada simulação teste e para o CONTROLE a precipitação total acumulada considerando todos os nodos dentro desta área em cada uma das cinco horas (os dados são apresentados na Figura 5.5).

Uma hora depois de terminar o evento de tempo severo, todas as simulações mostraram valores baixos de precipitação acumulada, só a S1_5 que mostrou um valor acima da média chegando a mais de 2000 mm totais na área, o que dá menos de 1 mm por nodos (considerando que dentro da região delimitada existem aproximadamente 2280 nodos de grade). Nessa primeira hora, o CONTROLE foi o que menos valor de precipitação total registrou. Na segunda hora (17:00 UTC do dia 06/06/2017) os valores para todas as simulações ainda ficaram baixos, sendo menores a 2000 mm em todos os casos. Posteriormente, a tendência foi de aumento generalizado na terceira hora em análise até que na quarta hora foram alcançados os maiores valores de precipitação acumulada horária em todas as simulações. Os testes S1_2, S1_5, S1_7 e S1_8 alcançaram valores totais acima de 6000 mm, que é um valor alto mesmo que distribuído na área selecionada. Apenas as simulações S1_1 e S1_3 tiveram valores menores de acumulados de precipitação na área menores ao CONTROLE_1. Destaca-se a simulação S1_4 que nas últimas duas horas em análise ficou com acumulados horários totais acima de 16000 mm, que é um valor significativo.

Na última hora, aquelas simulações que tiveram os maiores acumulados na quarta hora diminuíram os valores, enquanto as que tinham registrado os menores valores passaram a crescer. No geral, além da simulação S1_4 que teve um incremento expressivo nas últimas duas horas, as simulações que tiveram mudanças na superfície (S1_7 e S1_8), a S1_2, que teve em comum com a S1_4 a diminuição dos aerossóis *ice frindly*, assim como a S1_5, foram as que mais registraram precipitação total acumulada na área delimitada durante as 5 horas de análises.

Figura 5.5 - Valores de precipitação total acumulada no subdomínio delimitado pelo retângulo vermelho da Figura 3.22 no período entre as 16:00 UTC e as 20:00 UTC do dia 06/06/2017.



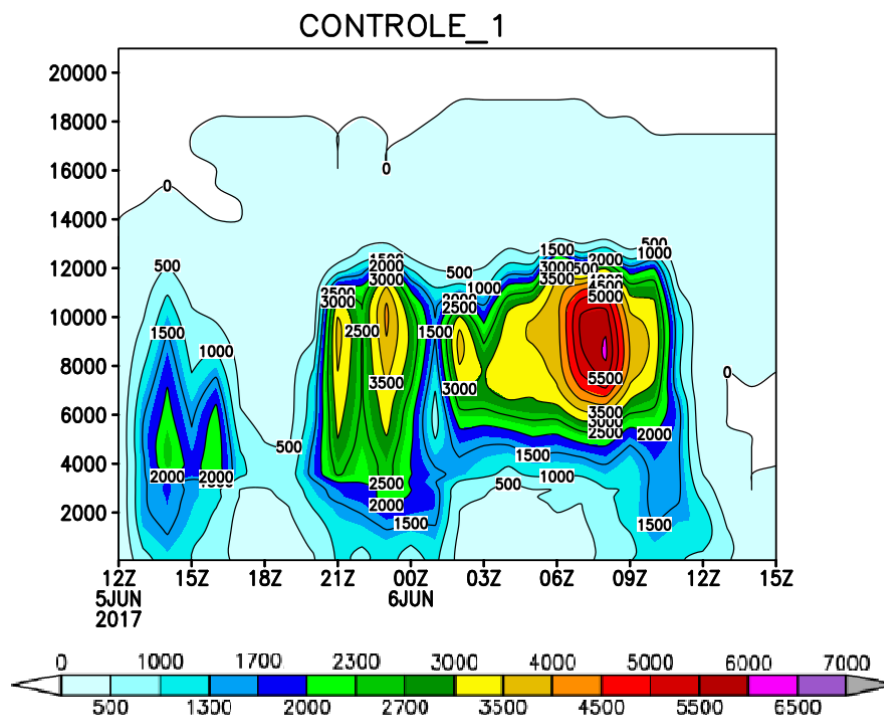
Fonte: Produção do autor.

5.1.2 Análise das características dos hidrometeoros. Caso de estudo 01

Para analisar o impacto das mudanças introduzidas em cada teste de sensibilidade sobre os hidrometeoros que formam as nuvens na RMSF e estão relacionados com a precipitação, se selecionou a área mencionada no item anterior, que apresenta a quase totalidade dos casos de subestimação da precipitação total acumulada em relação com o CONTROLE_1. Essa área está delimitada pelas latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -43,25 e -46,8 e está identificada com um retângulo azul na Figura 3.22.

Para entender melhor o comportamento dos hidrometeoros totais condensados estimados pelo sistema de modelagem em cada simulação, que inclui os líquidos e o gelo, se fez um corte vertical com o valor total na área para cada nível de altura (Figura 5.6 e 5.7). Foram consideradas, neste caso de estudo, as 28 horas que durou o evento de precipitação extrema sobre a RMSP. Ao analisar a Figura 5.6 com os dados para o CONTROLE_1 percebe-se que durante o período em análise 3 conjuntos principais de máximos valores são identificados. Um primeiro que surge com o início da simulação e estende aproximadamente até as 18:00 UTC do dia 05/06/2017, um segundo com três pequenos núcleos de valores máximos relativos entre as 20:00 UTC do dia 5 e as 02:00 UTC do dia 6, e um terceiro entre as 04:00 UTC e as 11:00 UTC do dia 06/06/2017. É no terceiro máximo que se alcançam os maiores valores de concentração dos hidrometeoros totais condensados na área delimitada, a uma altura de aproximadamente 9 km sendo majoritariamente gelo.

Figura 5.6 - Representação na vertical e no tempo das concentrações em unidades de massa de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8 para a simulação de 1 km de resolução espacial associada ao CONTROLE_1. Valores em g/kg.



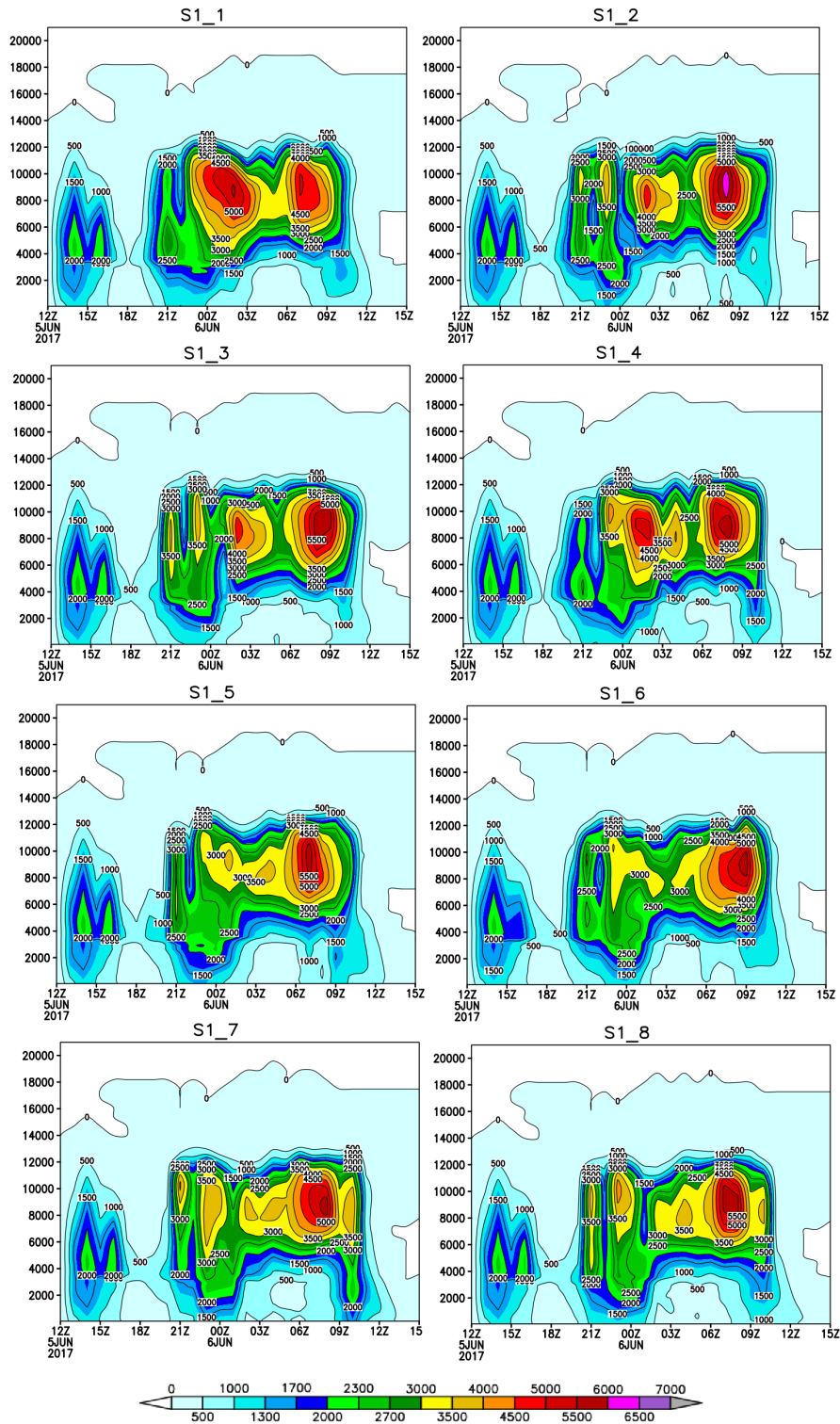
Fonte: Produção do autor.

Ao comparar as representações para cada teste de sensibilidade é possível avaliar que as maiores diferenças estão no conjunto central. O primeiro conjunto não teve diferenças significativas entre as simulações. Só a simulação S1_6 que apresentou uma leve redução na concentração aproximadamente às 15:00 UTC do dia 5. As simulações S1_1 e S1_4 apresentam valores mais elevados no segundo conjunto. As simulações S1_2 e S1_3 apresentaram características semelhantes com um segundo conjunto mostrando um terceiro núcleo mais intenso e melhor estruturado que se estendeu por mais tempo. Nas simulações S1_5 e S1_6, o segundo conjunto está desmembrado com um segundo núcleo menos intenso e mais tempo presente, e que praticamente elimina o terceiro núcleo.

Para as simulações S1_7 e S1_8 se observa que o terceiro conjunto ficou dividido em dois núcleos de máximos valores de concentração. O primeiro dos núcleos desse conjunto é o mais intenso, e o segundo com valores menores e mais curto no tempo, perto do período de precipitação intensa. Nos testes de sensibilidade onde as únicas mudanças foram as concentrações dos aerossóis, se observou que a localização das regiões com valores máximos e mínimos de concentração de hidrometeoros, sobre o subdomínio que abrange a RMSP, não sofreram variações. Já nos casos com mudanças da superfície as áreas de convergência e divergência foram mudando de localização em relação na comparação com o CONTROLE com o passar do tempo. Essa situação aconteceu nos dois casos de estudo, como será visto no Item 5.2.

Nas últimas 3 horas, os valores de concentração são baixos em todas as simulações, indicando que a precipitação vista entre as 18:00 UTC e as 20:00 UTC do dia 06 (Figura 5.5) está associada a outro conjunto não mostrado nas Figuras 5.6 e 5.7.

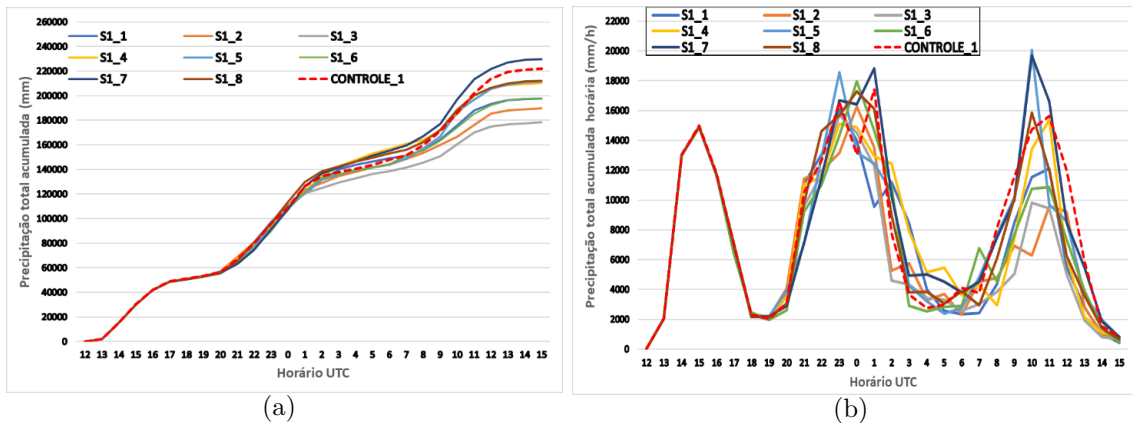
Figura 5.7 - Representação na vertical e no tempo das concentrações de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8 em cada teste de sensibilidade para o caso de estudo 01. Na vertical a altura em metros e na horizontal as horas em UTC do período de evento severo.



As características da precipitação acumulada total e horária (Figuras 5.8(a) e 5.8(b)) na área delimitada para o estudo dos hidrometeoros ficou consistente com o observado anteriormente nas concentrações. Três pulsos de precipitação são representados na Figura 5.8(b) e estes estão estreitamente relacionados com os 3 conjuntos mostrados anteriormente nos cortes verticais de concentração de hidrometeoros totais condensados.

Na Figura 5.8 se observa que tanto os valores acumulados totais como os horários (intensidade) ficam praticamente iguais durante o primeiro pulso associado ao primeiro conjunto de concentração de hidrometeoros, que também apresentou características semelhantes em todos os testes. As alterações perceptíveis na precipitação aparecem no segundo pulso, que é onde os conjuntos apresentam estruturas mais diferentes.

Figura 5.8 - Gráficos referentes à precipitação na região compreendida entre as latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8. Caso de estudo 01. (a) Precipitação total acumulada (mm), (b) precipitação total acumulada em cada hora do período de estudo (mm/h).



Fonte: Produção do autor.

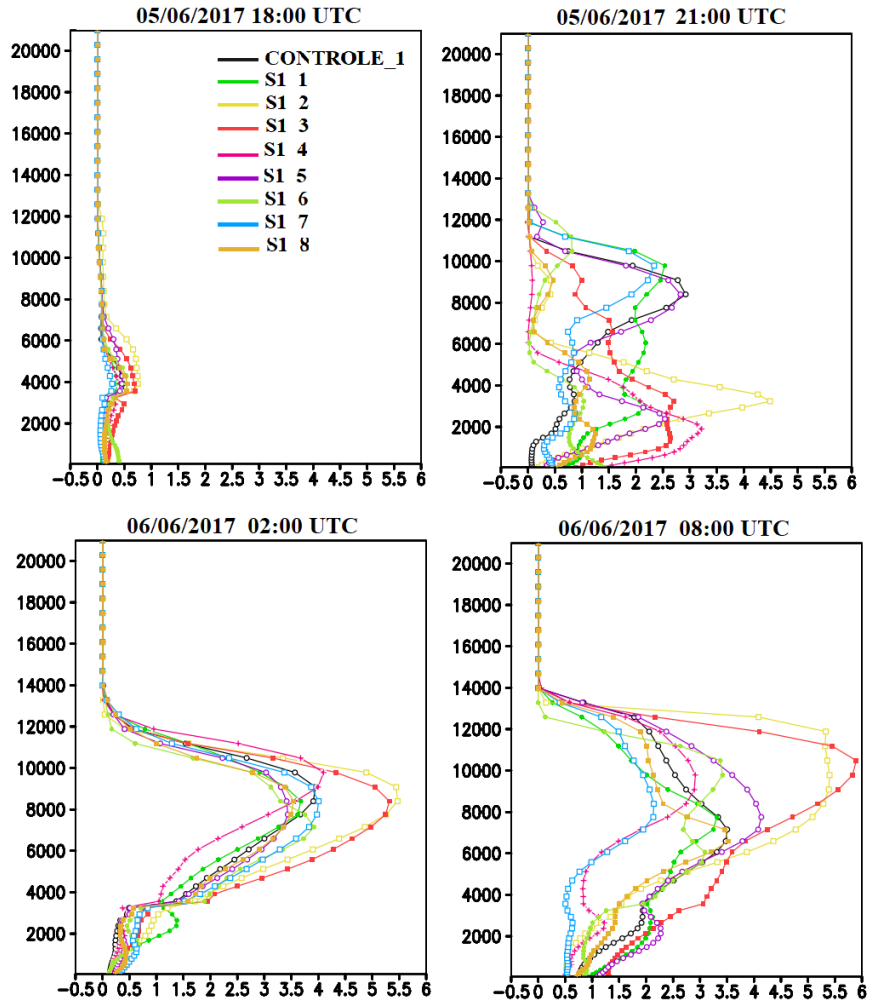
A Figura 5.9 ajuda a entender a situação descrita até aqui. Nela são mostrados valores de concentração dos hidrometeoros totais em função da altura sobre o ponto onde se observou a maior precipitação no CONTROLE_1 dentro da área delimitada para a análise (coordenadas do ponto: latitude = -23,27, longitude = -47,25). A representação é feita em momentos específicos antes e depois dos picos de precipitação horária.

Às 18:00 UTC do dia 5 de junho as concentrações de hidrometeoros são baixas em todas as simulações, e presentes principalmente em estado líquido e na baixa atmosfera. Até esse momento se observam diferenças mínimas na precipitação em todas as simulações. No momento do começo do segundo pulso de precipitação acumulada horária, 21:00 UTC do dia 5 de junho, já se manifestam diferenças significativas de concentração sobre o ponto escolhido para análise. As simulações CONTROLE_1, S1_6, S1_7 e S1_8 apresentavam baixos valores de hidrometeoros condensado líquido em comparação com as outras simulações. A S1_2, que teve os aerossóis totais diminuídos, apresenta a maior concentração em massa dos hidrometeoros na parte baixa da atmosfera, enquanto o CONTROLE_1 teve a maior concentração de hidrometeoros em estado sólido na alta troposfera. Os menores valores de concentração de gelo foram registrados nas simulações que tiveram algum tipo de aerossol diminuído (S1_2, S1_4, S1_6 e S1_8). Nesse segundo pulso, a S1_3 já começa a mostrar valores de precipitação acumulada menores que as restantes simulações (Figura 5.9).

Às 02:00 UTC do dia 6 de junho, no final do segundo pulso de precipitação acumulada horária, se observam valores elevados de concentração de hidrometeoros na alta troposfera em todas as simulações. Destacam a S1_2 e S1_3 com os valores mais altos. As concentrações de hidrometeoros abaixo de 4 km não ultrapassam o valor de 1,5 g/kg em todas as simulações, incluindo o CONTROLE_1.

Às 08:00 UTC do dia 6 de junho, justo no começo do terceiro pulso de precipitação, se observam maiores valores de concentração de hidrometeoros em média na parte baixa da troposfera. A exceção é a simulação S1_7, que apresentou os menores valores de concentração em toda a coluna vertical, indicando talvez o descolamento da área de maiores valores em relação ao CONTROLE_1. A simulação S1_3, que teve os aerossóis higroscópicos aumentados, apresenta os mais altos valores de concentração em toda a coluna vertical. Essa situação provoca uma queda maior no acumulado horário visto na Figura 5.8(b), que se traduz numa subestimação maior para a área em análise em relação ao CONTROLE, como foi visto na Figura 5.2. A simulação S1_2 também apresenta altos valores de hidrometeoros na alta troposfera, influência da diminuição principalmente dos aerossóis higroscópicos, e baixos valores de acumulados horários de precipitação e subestimação alta da precipitação na área de análise.

Figura 5.9 - Concentração de hidrometeoros totais sobre o ponto de maior precipitação acumulada para o CONTROLE_1 dentro da região compreendida entre as latitudes -23,5 e -23,2 e as longitudes -47,25 e -46,8. As coordenadas do ponto são latitude = -23,27, longitude = -47,25. Gráficos para 4 momentos diferentes dentro do período total de precipitação extrema para o caso de estudo 01. Na vertical a altura em metros e na horizontal a concentração em massa (g/kg) dos hidrometeoros.



Fonte: Produção do autor.

5.2 Caso de estudo 02: Análise dos Testes de Sensibilidade.

5.2.1 Efeitos na Precipitação. Caso de estudo 02

Neste caso de estudo, onde a atividade convectiva local local tem um papel mais importante, as características das diferenças na precipitação estimada entre os testes de sensibilidade e o CONTROLE_2 são menos homogêneas. Os padrões de precipitação observados em cada simulação e no CONTROLE_2 apresentam muitas semelhanças, e as diferenças são menos perceptíveis do que no caso de estudo anterior (Figura 5.10). As áreas de máxima precipitação são estimadas na faixa entre as sub-regiões Oeste e Sudeste da RMS, e também em parte do norte da sub-região Leste. Para os testes em que se faz mudança nas características da superfície, S2_7 e S2_8, são observados maiores valores de precipitação no quadrante noroeste do subdomínio, e menores valores na sub-região Sudeste, isso quando comparadas estas simulações com todas as outras em análises, incluindo a controle.

São observadas em todos os testes áreas dispersas de subestimação e superestimação sem padrões definidos (Figura 5.11). No entanto, é possível identificar algumas áreas onde as diferenças são maiores, por exemplo, a localizada entre as latitudes -23,7 e -23,4 e longitudes -47,2 e -46,9, que geralmente apresentou maior precipitação estimada em todos os testes de sensibilidade em relação ao CONTROLE. Excetuando as simulações com mudanças na superfície urbana, as diferenças na precipitação entre os testes e a referência praticamente não ultrapassaram os 10 mm, seja para cima ou para baixo.

Ao comparar as simulações S2_1 e S2_2, ambas contemplando variações nas concentrações de aerossóis totais utilizados na microfísica de nuvens, as diferenças são mínimas entre elas. São observadas variações principalmente nos valores máximos dos núcleos de maior precipitação. No norte da sub-região Leste, a simulação S2_2 estimou áreas maiores de precipitação acima de 30 mm, enquanto nas sub-regiões Norte e Oeste, a simulação S1_1 estimou a maior precipitação total acumulada (Figura 5.10). Na sub-região Sudoeste, a estimativa de precipitação associada à S2_1 foi ligeiramente maior que a associada à S2_2. Em relação às diferenças com o CONTROLE_2, em ambos casos se subestimou a precipitação no interior dos municípios de Pirapora de Bom Jesus e Santana de Parnaíba, pertencentes à sub-região Oeste, e também em localidades de Cajamar na sub-região Norte, zonas de maiores acumulados de precipitação. No entanto, uma superestimação foi localizada ao norte de Cajamar em ambos testes e as maiores diferenças estiveram na superestimação apresentadas nos testes de sensibilidade sobre o oeste do município de Santa de Parnaíba e Itapevi, indicando um deslocamento da área de máxima precipitação em relação ao CONTROLE, e não uma diminuição total da precipitação nesse quadrante noroeste do subdomínio. Aqui fica evidente a conclusão do trabalho realizado por (RODRIGUEZ et al., 2010), que observou que o papel dos aerossóis totais não é tão determinante nos meses de verão, e principalmente devido à forte convergência de massa associada à convecção que favorece o evento de precipitação.

Quando são comparadas as simulações com variações unicamente nos aerossóis não higroscópicos (S2_3 e S2_4), se observa que enquanto um aumento das concentrações deste tipo de aerossol praticamente não provoca mudanças acima de 10 mm na precipitação estimada para o caso de estudo em análise, a diminuição da concentração favorece em maior medida a subestimação da precipitação na região de maior acumulado total no quadrante noroeste do subdomínio. Ao mesmo tempo, na S2_4 são observadas áreas de superestimação acima de 10 mm em relação ao CONTROLE sobre os municípios de São Roque e Ibiúna que fazem fronteira com o oeste da RMSP. Enquanto o aumento das concentrações de *ice friendly* provocou principalmente variações no tamanho das áreas de precipitação, a diminuição deste aerossol causou variações nos valores máximos e mínimos relativos da precipitação.

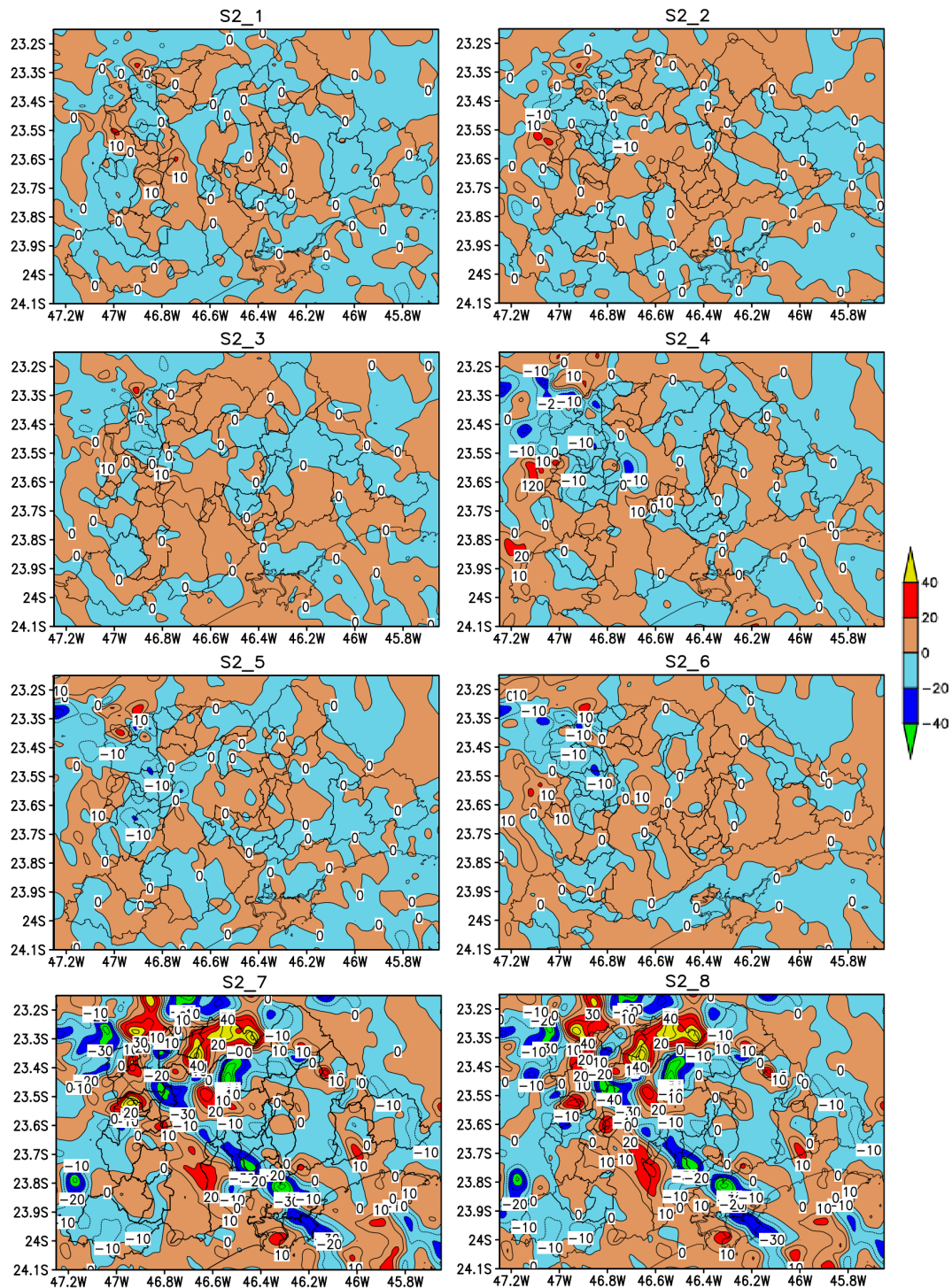
Ao considerar as duas simulações com variações nas concentrações de *water friendly* (S2_5 e S2_6), é observada novamente que as maiores diferenças, em relação ao CONTROLE_2, estão no quadrante noroeste com regiões de subestimação predominando e picos localizados de superestimação acima de 20 mm. A diminuição da concentração dos aerossóis higroscópicos (S2_6), favoreceu um aumento perceptível da região de superestimação em todo o subdomínio de análise, principalmente nas sub-regiões Leste, Sudeste e Sul do município de São Paulo.

Comparando as simulações S2_3 e S2_5, com aumentos respectivos nos aerossóis não higroscópicos e higroscópicos, se observa que no geral a simulação S_5 apresentou mais subestimação da precipitação em relação ao controle do que a simulação S2_3. Ao mesmo tempo, os valores máximos(positivos) e mínimos(negativos) das diferenças (Figura 5.11) foram mais expressivos na S2_5, principalmente no quadrante noroeste. O contrário se observou na comparação entre as simulações com diminuição dos aerossóis não higroscópicos e higroscópicos, S2_4 e S2_6, respectivamente. Enquanto na S2_4 se observa um leve aumento das regiões com subestimação em relação ao CONTROLE, principalmente na sub-região Leste da RMSP, na S2_6 predomina a superestimação. Nessa relação, os valores extremos das diferenças de precipitação com o CONTROLE_2 são mais expressivos para a simulação S2_4, e novamente no quadrante noroeste, com mais áreas de subestimação alcançando diferenças abaixo de -20 mm.

No caso da simulação S2_7, para este caso de estudo, se observa as variações significativas em relação ao CONTROLE_2, reforçando os resultados mencionados na Seção 2.2.1, que indicam que a precipitação associada a eventos de escala local (convecção) pode sofrer maior influência da superfície urbana do que aqueles associados a um sistema de grande escala, como foi no caso de estudo 1. Áreas significativas de superestimação e subestimação com valores que ultrapassaram os 40 mm de diferença são encontradas na estimativa de precipitação para a simulação S2_7 quando comparada com a referência. Indicando assim mudanças na localização e na intensidade dos núcleos convectivos, que se traduzem em trocas no padrão de precipitação. Enquanto na sub-região Sudeste predominou a subestimação, nas sub-regiões Norte e Oeste a superestimação esteve presente em maior medida.

A simulação S2_8 mostrou características semelhantes à S2_7, com diferenças na precipitação em relação à referência bem significativas em todas as zonas de máximos acumulados de precipitação. Isso corrobora que para este caso de estudo em questão, as mudanças na superfície provocam variações na precipitação mais relevantes do que as mudanças nas concentrações dos aerossóis. Lembrando que neste estudo só se modifica a concentração dos aerossóis e não a localização, que já foi identificada como característica de suma importância nesse tipo de estudo (LEE et al., 2018).

Figura 5.11 - Caso de estudo 02: Representação espacial das diferenças entre a precipitação total acumulada no período de estudo pelos testes de sensibilidade e o CONTROLE_2, subdomínio que abrange a RMSP.



Fonte: Produção do autor.

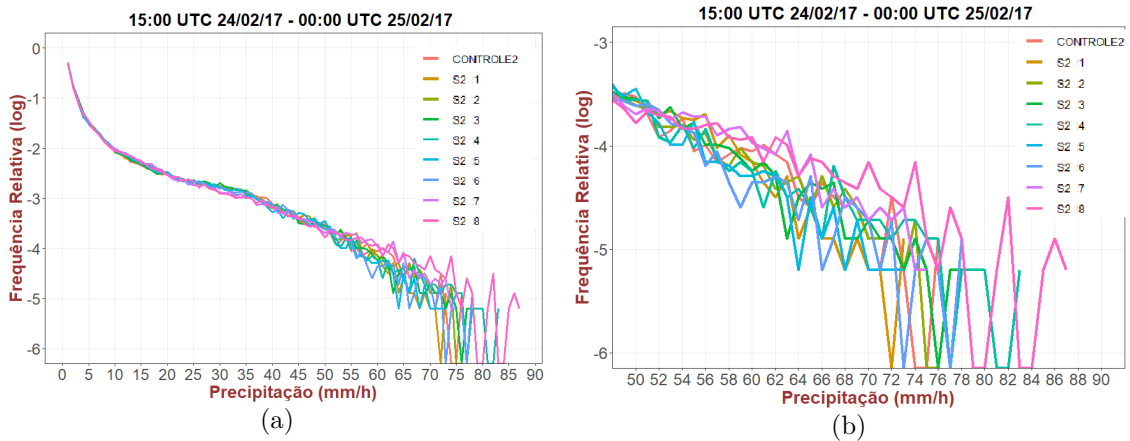
A análise de intensidade foi baseada nos dados de precipitação horária para cada nodo da grade de 1km de resolução espacial que fica dentro do subdomínio que abrange a RMSP, o mesmo no qual se realizou a representação da precipitação total acumulada. O período para este caso de estudo foi menor, 9 horas no total. Na Figura 5.12 estão apresentados os resultados para a frequência absoluta, em escala logarítmica, associada ao conjunto de dados referidos anteriormente.

Em todas as simulações analisadas, incluindo o CONTROLE_2, os valores de precipitação horária nos nodos ficaram majoritariamente abaixo de 10 mm/h, com aproximadamente 90 % do total dos dados nesse intervalo. A convergência das curvas de frequência relativa é observada até aproximadamente os 50 mm/h (Figura 5.12(a)), momento em que a separação entre elas começa ser mais evidente, e que tem mais importância nesta análise. Em todas as simulações para este caso de estudo, os valores de intensidade de precipitação registrados nos nodos e no período de interesse constituíram mais do 95 % do total dos registros.

Na Figura 5.12(b) é apresentada a ampliação do gráfico de frequência relativa para o intervalo acima de 50 mm/h. A simulação do CONTROLE_2 teve valores de intensidade de até 76 mm/h, os testes de sensibilidade tiveram valores máximos que ficaram próximos desse valor (entre 73 e 78 mm/h), com exceção da S2_4 e S2_8 que alcançaram valores de intensidade máxima acima de 82mm/h. A simulação S2_8 apresentou valores máximos de intensidade de até 87 mm/h. As frequências relativas associadas aos valores entre o intervalo de 55 a 76 mm/h ficaram mais altas, como se observa no gráfico, em relação simulações. Para essa mesma simulação, obteve-se frequências mais baixas no intervalo entre 25 e 50 mm/h.

Para a simulação S2_7, o valor máximo alcançado foi de 75 mm/h, ligeiramente acima do CONTROLE_2 e menor que o obtido pela simulação S2_8 que também teve a mancha urbana substituída. No entanto, os valores de frequência relativa para esta simulação associados aos dados de intensidade de precipitação no intervalo entre 50 e 75 mm/h também ficaram na média maiores em relação aos associados aos testes de sensibilidade do S2_1 ao S2_6.

Figura 5.12 - Gráficos de frequência relativa (em escala logarítmica) associados aos dados de intensidade de precipitação em cada nodo correspondente ao subdomínio que abrange a RMSF e em cada hora do período de estudo. Caso de estudo 02. (a) Valores de precipitação entre 0 e 90 mm/h, (b) valores de precipitação entre 50 e 90 mm/h.



Fonte: Produção do autor.

Para entender melhor as mudanças na intensidade da precipitação foram analisadas os dados relacionados com a quantidade de nodos em cada simulação que registraram valores acima de 50 mm/h. Essa informação está apresentada na Figura 5.13, especificamente as barras laranjas que indicam a relação dessa informação entre o teste de sensibilidade específico e o CONTROLE_2 (dados normalizados).

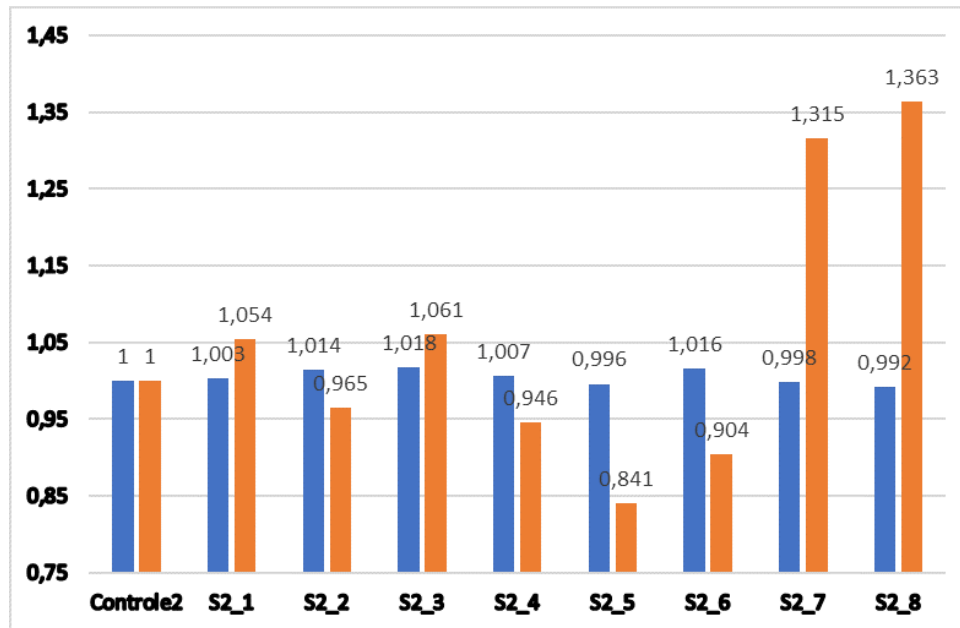
Neste caso de estudo, similar ao acontecido no caso de estudo 01, as simulações com mudanças na superfície tiveram um maior número de pontos com intensidade de precipitação acima de 50 mm/h, situação que já percebida na Figura 5.12 de frequência relativa. Em ambos casos, S2_7 e S2_8, esse número de nodos ficou acima de 30 % em relação ao CONTROLE. No intervalo entre 10 e 40 mm/h ambos testes também estiveram entre os que mais pontos teve, com intensidades de precipitação ficando logicamente menor no intervalo entre 0 e 10 mm/h. Fica evidente então que para este caso de tempo severo, as mudanças na superfície contribuíram com aumento na intensidade da chuva de forma geral no subdomínio em análise.

As simulações que tiveram menor número de nodos com intensidades no intervalo acima de 50 mm/h, foram as relacionadas com mudanças exclusivas nas concentrações dos aerossóis higroscópicos, S2_5 e S2_6. Essa situação é diferente do visto no caso de estudo 01, onde as mudanças nos aerossóis não higroscópicos tiveram os menores valores associados. O aumento dos aerossóis *water friendly* provocou a maior queda na intensidade total registrada considerando todo o subdomínio e período do evento, para essa simulação os nodos com intensidades acima de 50 mm/h representaram 84,1 % do total do CONTROLE. No entanto vale a pena ressaltar que a simulação S2_6 foi a que mais nodos teve registrando valores de intensidade no intervalo entre 10 e 50 mm/h, com aproximadamente 6 % de nodos a mais em relação ao CONTROLE_2.

Além das simulações com mudanças na superfície, as outras que tiveram mais nodos registrando valores de intensidade acima de 50 mm/h em relação com o CONTROLE foram as S2_1 e S2_3, sendo que o ponto comum entre elas é o aumento dos aerossóis não higroscópico. No intervalo entre 10 e 40 mm/h ambas simulações tiveram dados de intensidade semelhantes entre elas e o CONTROLE_2. A simulação S2_4 teve 5,4 % pontos a menos, com intensidade acima de 50 mm/h, que o CONTROLE.

Em relação aos valores de precipitação total estimada no subdomínio em estudo, isto é, a soma da precipitação em todos os nodos dentro dessa região em questão, os valores continuam a ser muito parecidos entre eles, com diferenças em relação ao CONTROLE_2 que não ultrapassam 2 %. A simulação com aumento dos aerossóis *ice friendly*, S2_3, foi a de maior precipitação de forma geral, com um total que ultrapassou em 1,8 % o total acumulado tido como referência.

Figura 5.13 - Histograma incluindo de valores de precipitação acumulada total no subdomínio que abrange a RMSP no período de estudo (barras azuis) e números de nodos do mesmo subdomínio com valores registrados de precipitação horária acima de 15 mm (barras laranjas). Em ambos casos os valores foram normalizados a partir da divisão pelo valor associado ao CONTROLE_2. Dados correspondentes ao caso de estudo 02.



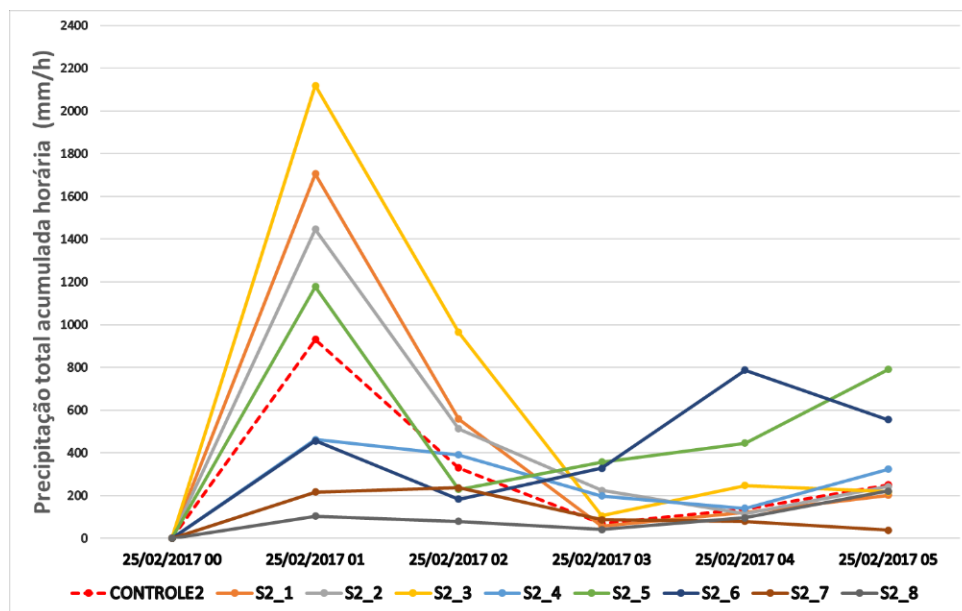
Fonte: Produção do autor.

Neste caso, para a análises da duração da precipitação além do período determinado como de evento severo, foram computados também os valores de precipitação total acumulada horários dentro da área delimitada pelo retângulo vermelho na Figura 3.22, começando à 01:00 UTC e terminando às 05:00 UTC do dia 25/02/2017. Os valores obtidos para este caso são significativamente menores aos vistos no caso de estudo 01, isso em parte por ser chuva convectiva localizada que não afeta áreas muito grandes ao mesmo tempo.

Os dados mostram que na primeira hora, depois do final do evento, se alcançam os maiores valores de acumulado horário, entre as 5 horas analisadas, para 4 das simulações testes (S2_1, S2_2, S2_3 e S2_5) e também para o CONTROLE_2 (menor valor entre as 5) (Figura 5.14. À 01:00 UTC as simulações S2_3 e S2_8 alcançaram o maior e menor valor de acumulado horário, respectivamente, foram as mesmas que tiveram as maiores diferenças no acumulado total de precipitação em relação ao CONTROLE_2 (Figura 5.11) durante o período do evento extremo. Ambas mostraram os menores valores de intensidade nas 5 horas posteriores ao final do evento para a área analisada.

Depois da primeira hora, a tendência das 5 simulações que tinham alcançado os valores maiores foi de diminuição até chegar a valores quase insignificantes, comparado com o tamanho da área analisada, abaixo de 400 mm em total. Só as simulações S2_5 e S2_6 aumentaram a intensidade da precipitação horária, mas sem ultrapassar os 800 mm e total para área.

Figura 5.14 - Valores de precipitação total acumulada no subdomínio delimitado pelo retângulo vermelho da Figura 3.22 no período entre as 00:00 UTC e as 0:00 UTC do dia 25/02/2017

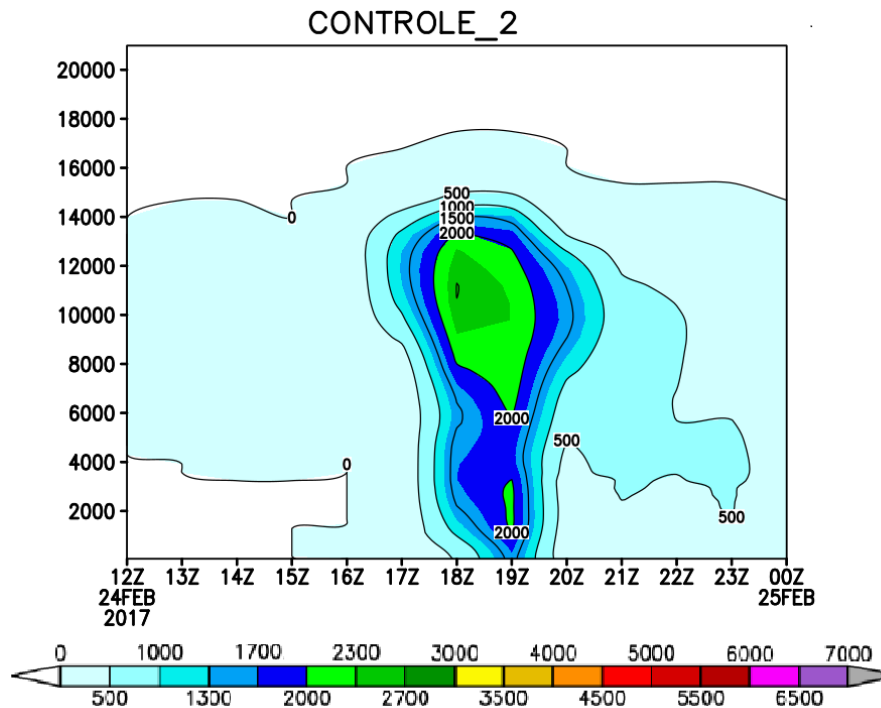


Fonte: Produção do autor.

5.2.2 Análise das características dos hidrometeoros. Caso de estudo 02

A região onde geralmente se observou a superestimação da precipitação total acumulada nos testes de sensibilidade em relação ao CONTROLE_2 foi escolhida para o estudo dos hidrometeoros neste caso de estudo. A área delimitada pelo retângulo verde na Figura 3.22 indica a região em questão, que está localizada entre as latitudes -23,7 e -23,4 e longitudes -47,2 e -46,9. Nas Figuras 5.15 e 5.16, é apresentada a série temporal do perfil vertical dos hidrometeoros totais condensados, considerando a soma dos valores dessa variável para cada nível vertical dentro da região limitada. Um único núcleo bem definido é encontrado para a simulação do CONTROLE_2 (Figura 5.15), o máximo está localizado a uma altura aproximada de 11 km e próximo das 18:00 UTC do dia 24/02/2017. O núcleo apresenta duas ramificações com máximos relativos, uma acima de 5 km e outra embaixo, a primeira relacionada com o gelo e a segunda com o líquido. Valores acima de 1000 g/kg são encontrados na alta troposfera até aproximadamente as 21:00 UTC do dia 24 e posteriormente uma área de valores entre 500 e 1000 g/kg se estende até praticamente o final do período de evento de precipitação extrema analisado.

Figura 5.15 - Representação na vertical e no tempo das concentrações em unidades de massa de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9 para a simulação de 1 km de resolução espacial associada ao CONTROLE_2. Valores em g/kg.



Fonte: Produção do autor.

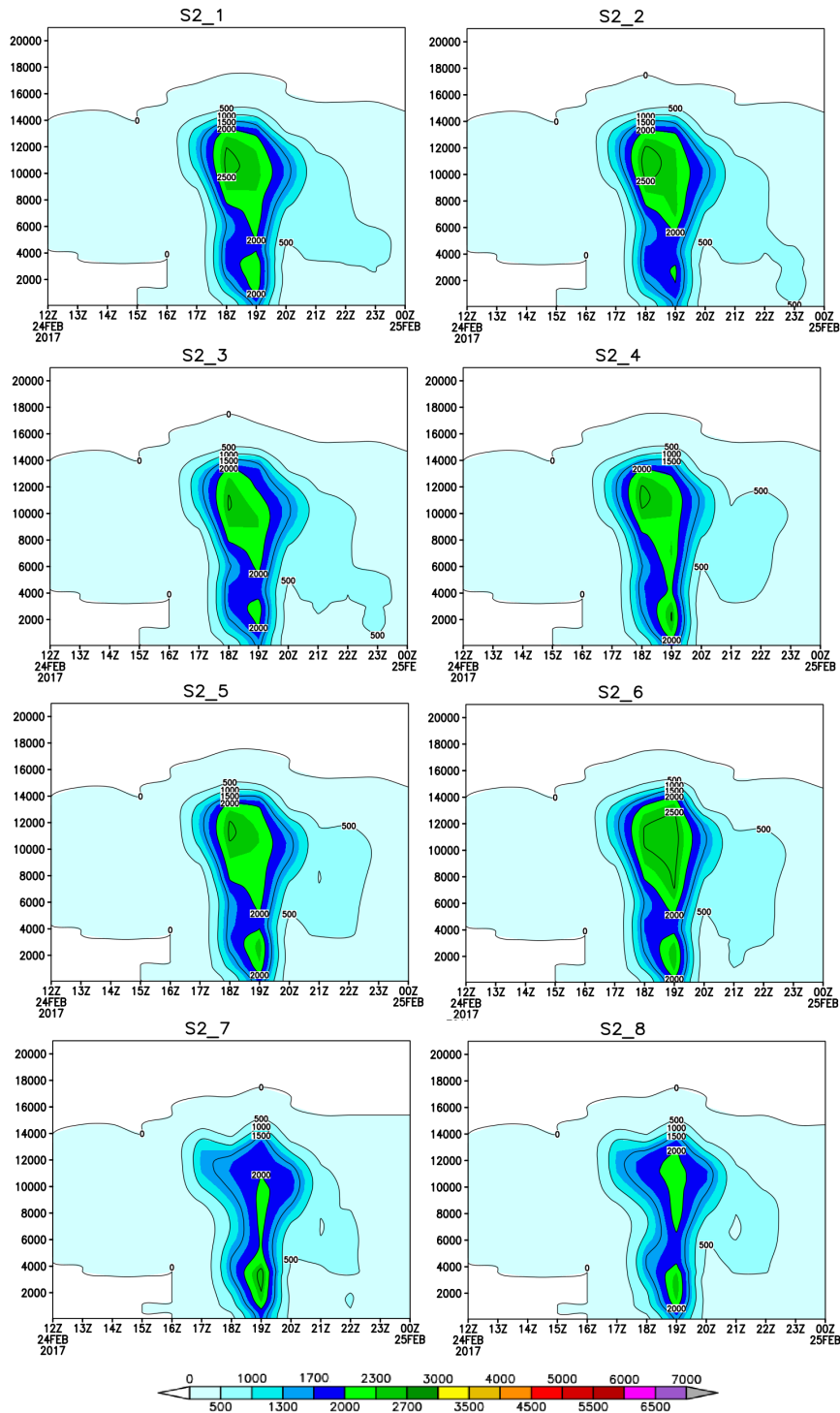
Na Figura 5.16 é feita a representação dos hidrometeoros para os testes de sensibilidade considerando as mesmas características de localização e tempo utilizadas para o CONTROLE_2. Em todos os casos, o padrão encontrado anteriormente se repete, um único núcleo com duas ramificações em alturas diferentes e uma área de valores entre 500 e 100 g/kg que se estende até quase finalizar o período analisado. As diferenças estão na forma do núcleo, no como esses hidrometeoros estão distribuídos com a altura e nos valores máximos alcançados dentro dele.

Assim, entre as simulações S2_1 e S2_2 a forma dos núcleos são muito semelhantes, mas com diferença na ramificação inferior, sendo que na segunda simulação a região de valores acima de 2000 g/kg está menor que na primeira simulação, onde aumentaram os aerossóis totais da microfísica de nuvens. Também, na ramificação superior, a área de máximos valores é maior para a simulação S2_2.

Para as simulações S2_3 e S2_4, temos que na segunda as concentrações dos hidrometeoros aumentaram no geral na baixa e média troposfera. Entre as 18:00 UTC e 20:00 UTC maiores valores foram estimados na simulação S2_4, no entanto a região com valores entre 500 e 1000 g/kg no período posterior se viu diminuída. Foi na simulação S2_4, entre as que tiveram mudanças unicamente nos aerossóis, que a superestimação foi mais significativa na área aqui analisada.

Entre as simulações S2_5 e S2_6, com variações nos *ice friendly*, se observa que quando o teste considerou a diminuição desses aerossóis (S2_6) os hidrometeoros aumentaram em concentração e em massa, principalmente na sua fase de gelo acima dos 5 km de altura. A superestimação na área para a S2_5 foi em maior medida que na S2_6.

Figura 5.16 - Representação na vertical e no tempo das concentrações de hidrometeoros totais condensados sobre a região delimitada pelas latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9 em cada teste de sensibilidade para o caso de estudo 02. Na vertical a altura em metros e na horizontal as horas em UTC do período de evento severo.



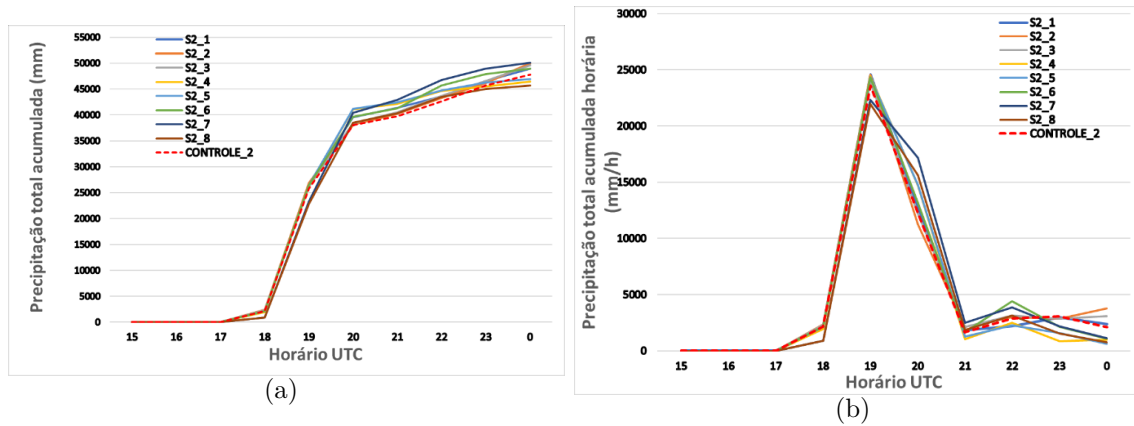
Fonte: Produção do autor.

A comparação entre as simulações com mudanças na superfície e o CONTROLE_2 indica que nas primeiras a ramificação superior diminuiu consideravelmente em tamanho e valor de concentração, enquanto a inferior aumentou. Agora, ao comparar a S2_7 e S2_8 se observa que na primeira simulação de teste as ramificações inferior e superior apresentaram maiores e menores valores, e a concentração dos hidrometeoros respectivamente em comparação com a segunda simulação. Na área analisada a superestimação da precipitação total em relação ao controle foi maior na simulação S2_7, e assim se repete o padrão em que onde for a maior concentração dos hidrometeoros na baixa atmosfera maior será superestimação observada da precipitação total em relação ao CONTROLE, isso especificamente neste caso de estudo.

Na Figura 5.17(a) se observa que a partir das 19:00 UTC do dia 24 de fevereiro, os valores de precipitação totais acumulados na área analisada para cada teste de sensibilidade e a simulação de referência, começam a divergir de forma leve entre as simulações. A partir das 20:00 UTC, as diferenças começam a ser mais perceptíveis, terminando com uma diferença entre a de maior acumulado e a de menor de aproximadamente 5000 mm para área analisada. Sendo que a simulação S2_7 apresentou o maior acumulado, e a S2_8 os menores. Interessante notar que apesar da S2_8 apresentar altos valores de superestimação dentro da área analisada, ela ficou com o menor acumulado total, isso devido à intensificação das zonas de subestimação observadas, que coincidem com as da S2_7 e ao surgimento de novas zonas dentro que levaram à anulação da superestimação localizada.

A Figura 5.17(b) mostra que a maior intensidade da precipitação na área foi às 19:00 UTC do dia 24 de fevereiro, sendo valores semelhantes para todas as simulações. Se observa um único pulso de chuva com posterior manutenção de chuva fraca até o final do período. As simulações S2_7 e S2_8 mostraram os menores valores máximos de intensidade no período, no entanto, nos horários das 20:00 e 21:00 UTC apresentaram os maiores valores, principalmente a S2_7

Figura 5.17 - Gráficos referentes à precipitação na região compreendida entre as latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9. Caso de estudo 02. (a) Precipitação total acumulada (mm), (b) precipitação total acumulada em cada hora do período de estudo (mm/h).



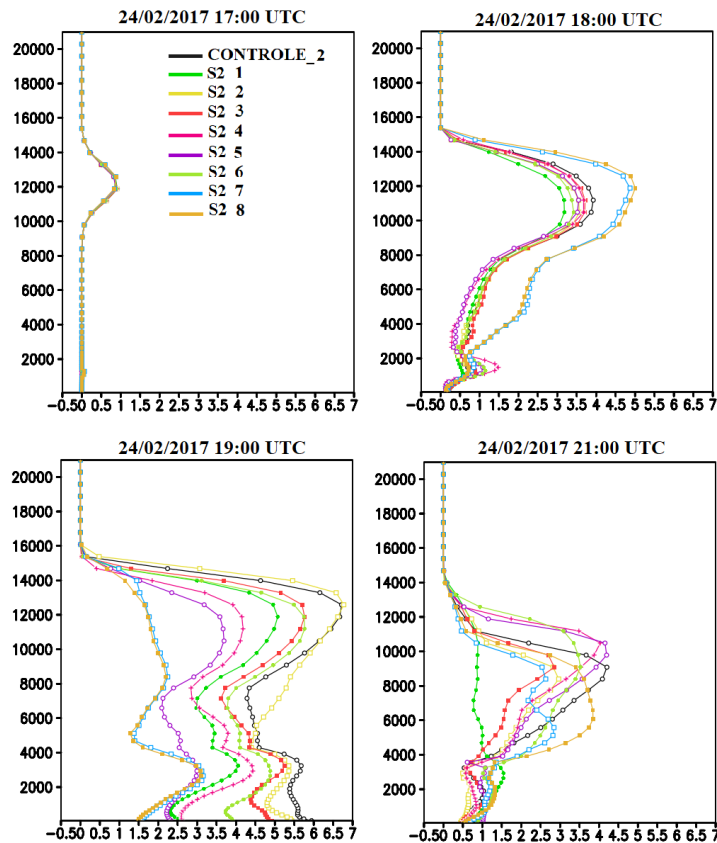
Fonte: Produção do autor.

O ponto de maior acumulado total de precipitação dentro da região aqui analisada para o CONTROLE_2 no período total de estudo se encontra localizado nas latitudes -23,57 e longitudes -46,91. Tomando-o como referência foram calculadas as concentrações do hidrometeoros totais na coluna vertical para cada simulação analisada nos horários das 17:00, 18:00, 19:00 e 21:00 UTC do dia 24 de fevereiro, os resultados são apresentados na Figura 5.18.

Num primeiro momento, antes de iniciar efetivamente a precipitação na área escolhida, foram observados baixos valores de concentração com máximos que começam a despontar na alta troposfera, indicando o começo do desenvolvimento do sistema convectivo. O incremento das concentrações se efetua de forma rápida, e às 18:00 UTC já se observam valores elevados de concentração para todas as simulações, principalmente entre os 9 e 13 km de altura. Nesse horário, o CONTROLE_2 apresenta maiores valores de concentração na altura que os estimados pelos testes de sensibilidade do S2_1 ao S2_6. As simulações S2_7 e S2_8 apresentam os maiores valores de concentração em massa de hidrometeoros entre todas as simulações. A velocidade vertical do vento apresentou-se alta entre as 17:00 UTC e 20:00 UTC em todas as simulações.

Às 19:00 UTC, as concentrações de hidrometeoros na fase sólida aumentaram para todas as simulações e o CONTROLE, com exceção das simulações S2_7 e S2_8, que diminuíram. As concentrações dos hidrometeoros na fase líquida nas camadas mais baixas da atmosfera aumentaram para todas as simulações. É neste horário que se alcança a fase de maior desenvolvimento do sistema responsável pela de precipitação. As simulações S2_2 e o CONTROLE_2 tiveram os maiores valores de concentração para todos os níveis verticais entre todas as simulações.

Figura 5.18 - Concentração de hidrometeoros totais sobre o ponto de maior precipitação acumulada para o CONTROLE_2 dentro da região compreendida entre as latitudes -23,7 e -23,4 e as longitudes -47,2 e -46,9. As coordenadas do ponto são latitude = -23,57, longitude = -47,91. Gráficos para 4 momentos diferentes dentro do período total de precipitação extrema para o caso de estudo 02. Na vertical a altura em metros e na horizontal a concentração em massa (g/kg) dos hidrometeoros.



Fonte: Produção do autor.

Posteriormente, às 21:00 UTC, as concentrações diminuem no geral, indicando a proximidade da fase final do desenvolvimento do sistema. Ainda as concentrações de hidrometeoros estão altas nas camadas mais altas da atmosfera, mas diminuíram consideravelmente nas camadas mais baixas. Diferenças significativas são observadas entre as simulações em análises, mas a complexa relação entre as características estudadas, relacionadas com os aerossóis e a superfície, e a própria formação da nuvem dificulta a identificação de padrões que possam explicar o comportamento da precipitação em cada caso.

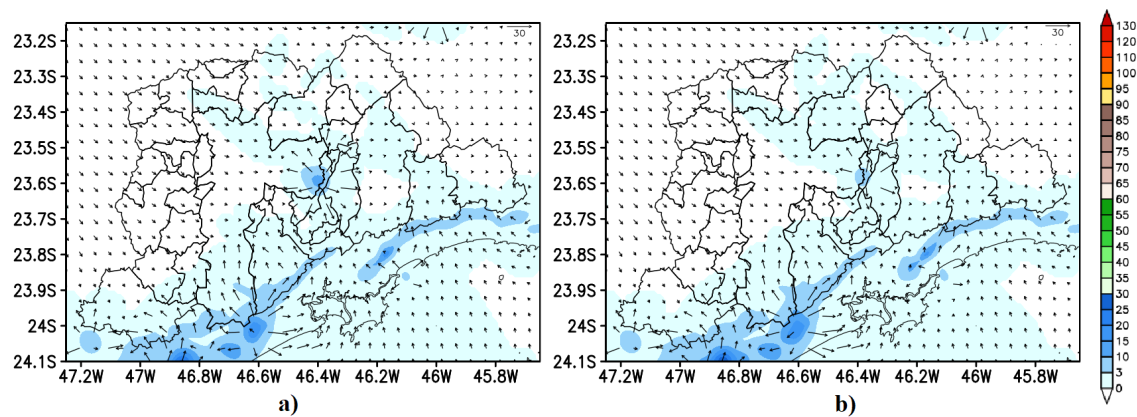
5.2.3 Impacto da Superfície no desenvolvimento de Tempestades Severas. Caso de estudo 02

Estudos anteriores (ZHONG et al., 2017) já mostraram que a magnitude dos efeitos na precipitação causados por mudanças na superfície depende em grande medida do cenário sinótico presente. Nesta pesquisa, no caso de estudo 01, percebeu-se que, com um sistema de grande escala associado ao evento de precipitação, os impactos foram menores em relação ao caso de estudo 2, que teve forte influência da circulação e atividade convectiva local. Nesta seção serão analisadas as características específicas do teste de sensibilidade S2_7, que consistiu na substituição da mancha urbana pela vegetação predominante (pastais arvoados) na região para entender em detalhes o papel da superfície nas mudanças na precipitação. Um estudo do comportamento de algumas variáveis em momentos específicos da integração do modelo, tanto para a simulação S2_7 como para o CONTROLE_2, é feito a seguir.

Para o caso de estudo 02, o início do evento de precipitação sobre a RMSP teve começo às 15:00 UTC do dia 24/02/2017 e um máximo de intensidade às 19:00 UTC, como já foi descrito anteriormente. Na Figura 5.19 se observa que padrões semelhantes de ventos são registrados em ambas simulações. A frente de brisa avançando sobre a RMSP, especificamente na porção sul, com precipitação registrada sobre a região da Serra do Mar. No extremo leste do município de São Paulo aparece uma área de divergência em superfície associada a um núcleo de precipitação que se mostra levemente mais intenso para o CONTROLE_2 em comparação com a S2_7. Essa diferença se deve, em parte, às condições que favoreceram uma convecção mais profunda pelo aquecimento em superfície na simulação que considera a mancha urbana.

A frente de brisa como mecanismo de disparo da convecção profunda foi favorecida pelo ambiente mais quente encontrado na região. Essa situação desencadeia uma série de efeitos que, em conjunto com outras características particulares associadas à presença ou não de mancha urbana, fizeram com que no final as diferenças entre os acumulados totais de precipitação fossem maiores.

Figura 5.19 - Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 16:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.

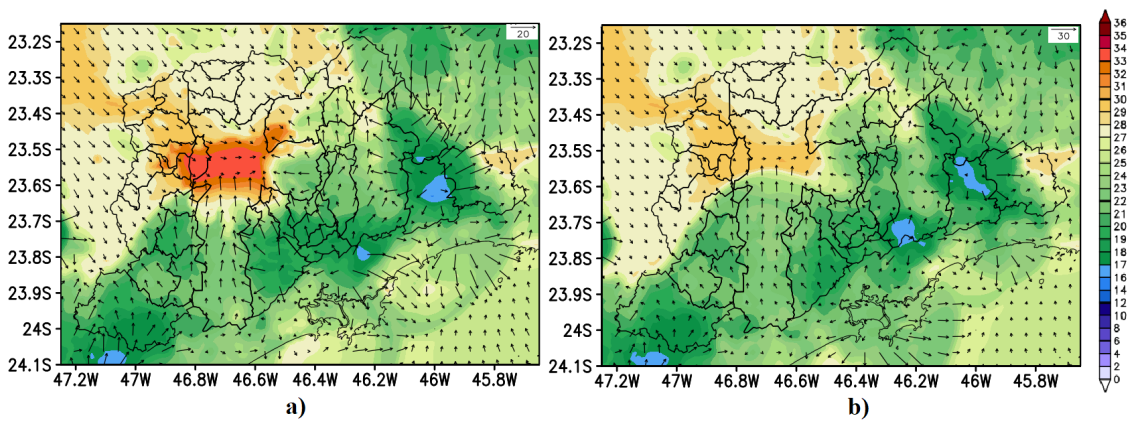


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.20a se pode observar que uma área significativa, sobre o centro do município de São Paulo e outros que fazem fronteira, com altos valores de temperatura, superiores aos observados na Figura 5.20b e obtidos na simulação que não considera a mancha urbana. O vento proveniente do interior do continente no caso urbano, além de mais intenso em relação ao cenário com vegetação, está mais quente que o que está entrando na região do oceano, e ajuda a formar essa banda NE-SE de altas temperaturas que claramente é intensificada pela presença da superfície urbana, que se apresenta mais quente que a vegetação nativa. Isso gera efeitos no avanço da Frente de Brisa, que experimenta um leve atraso neste caso de estudo como pode ser apreciado ao comparar ambas imagens da Figura 5.20, aproximadamente na latitude -23,5.

No momento em que a frente começa avançar sobre a região de mancha urbana os efeitos combinados das características da superfície (físicas e estruturais), junto com a termodinâmica, favorecem esse atraso, resultado já observado em outro estudo anterior (SILVA, 1986).

Figura 5.20 - Representação da temperatura em superfície (fundo colorido, oC) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSF às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROL_2, b) Estimativa associada à S2_7.

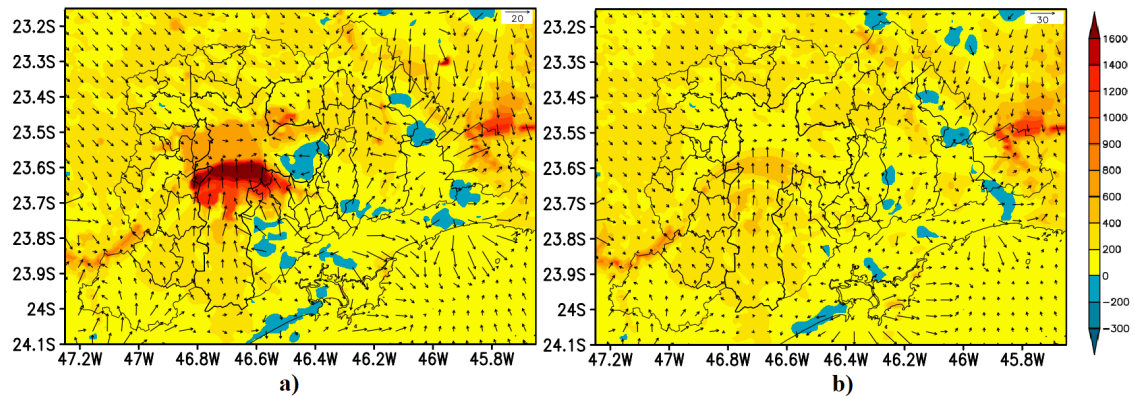


Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.21 mostra como o calor sensível apresenta um máximo associado à dianteira da frente de brisa e sobre o extremo sul da mancha urbana da região. A superfície, já aquecida anteriormente pela absorção de uma quantidade de radiação solar elevada provocada pelas propriedades físicas dos materiais que a compõem, começa a interagir com uma massa de ar mais fria e úmida proveniente do oceano, o que intensifica o fluxo de calor sensível entre a superfície a massa de ar a ela sobreposta. Essa situação favorece a instabilidade convectiva criando-se forças que debilitam o avanço da brisa e favorecem o movimento vertical.

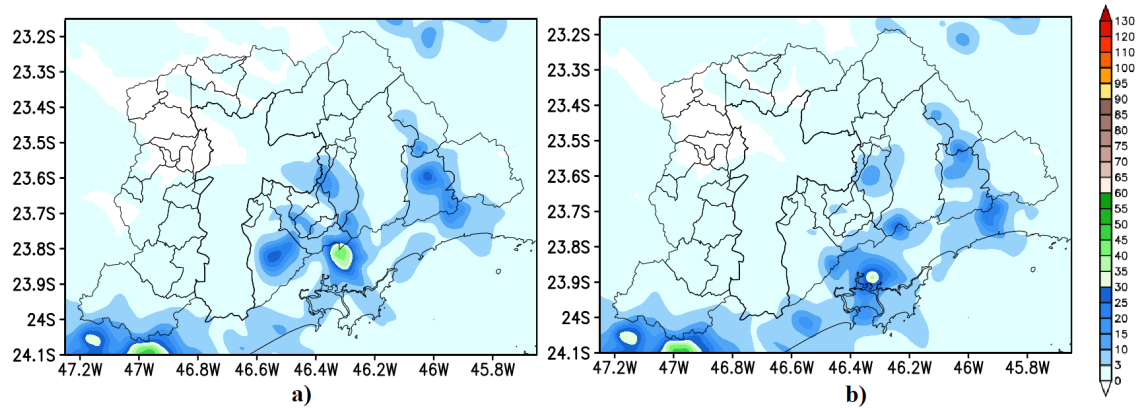
Outra situação diferente encontrada entre ambas simulações é a região de divergência sobre o centro e sul do município de São Bernardo do Campo associada também a uma área de precipitação mais intensa (Figura 5.22), isso no CONTROLE_2 em relação à S2_7. O avanço da frente de brisa sobre essa região, com influência da superfície altamente urbanizada, em conjunto com uma advecção maior em superfície provocada pela divergência no leste de SP, observada no horário anterior, são fatores que podem ter contribuído para esse evento local de precipitação. No CONTROLE_2 se observa uma área de altos acumulados de precipitação sobre os municípios de Santos, Cubatão e Guarujá que é estimada com menor intensidade na simulação sem região urbana. A circulação associada a esse evento local pode ter causado influência direta no desenvolvimento da convecção sobre o sul de São Bernardo do Campo.

Figura 5.21 - Representação do calor sensível (fundo colorido, W/m^2) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

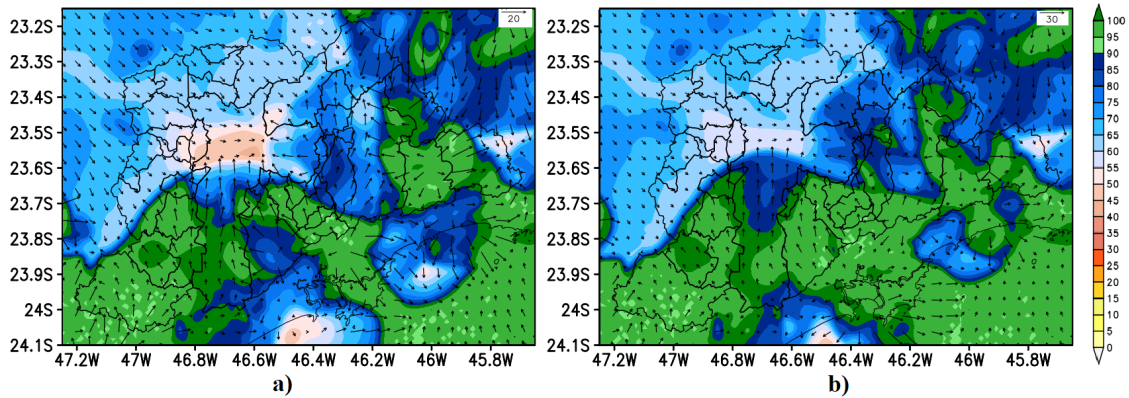
Figura 5.22 - Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

A umidade relativa é outra variável importante nesta comparação. Na Figura 5.23, é feita a apresentação da umidade sobre o subdomínio em estudo que abrange a RMSP. Destaca-se o baixo valor encontrado sobre a área urbana de São Paulo antes da chegada da frente de brisa (Figura 5.23a). No caso em que se substitui a mancha urbana pela vegetação são observados maiores valores de umidade (Figura 5.23b), mas mesmo assim percebe-se um gradiente forte na região da frente da brisa.

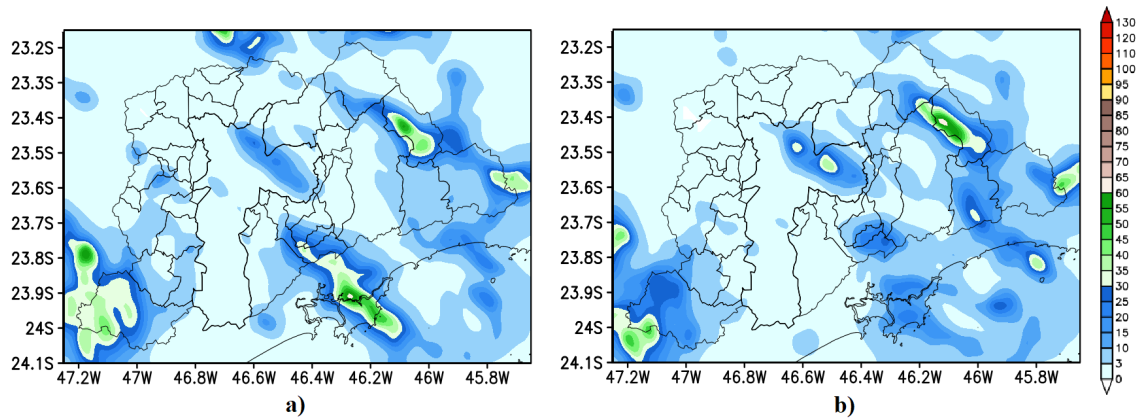
Figura 5.23 - Representação da umidade relativa em superfície (fundo colorido, %) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 17:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

Para o teste com área vegetada S2_7, aconteceu que o leve adiantamento da chegada da brisa marítima e uma disponibilidade maior de umidade favoreceram um desenvolvimento maior da célula local sobre parte do norte e leste do município de São Paulo e extremo sudoeste de Guarulhos em comparação com o CONTROLE_2. Na Figura 5.24 se observa que os valores de acumulados de precipitação entre as 17:00 e as 18 UTC do dia 24 de fevereiro foram maiores na simulação S2_7 (Figura 5.24b), além disso a área de precipitação no geral também foi maior. Isso provavelmente influenciou as características do estágio dispersivo desta célula, mudando a configuração dos fortes movimentos descendentes associados. Dessa forma se produz uma reação em cadeia onde outras células são formadas favorecidas pela advecção em superfície provocada por células em estado dispersivo, isso sobre uma região de forte instabilidade como a observada neste período de estudo sobre a RMSP.

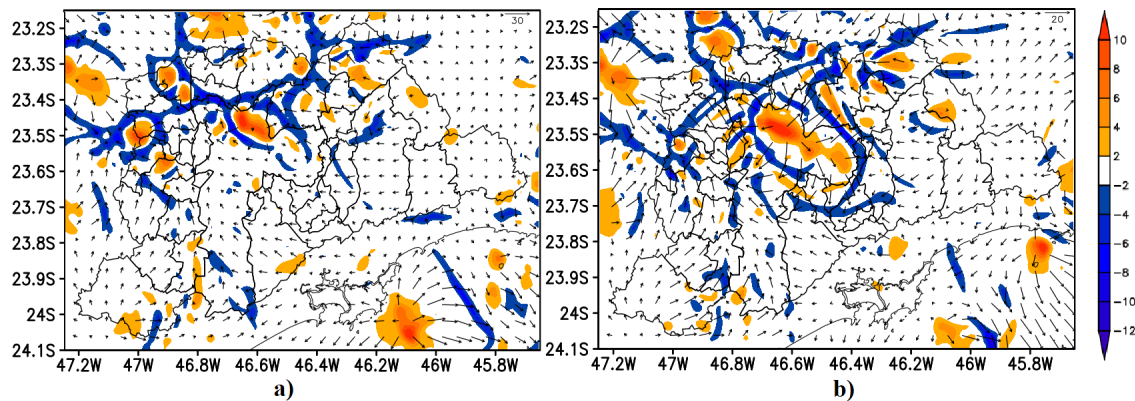
Figura 5.24 - Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 18:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.25 é possível apreciar que as regiões de divergência e convergência estão localizadas sobre lugares diferentes ao comparar as simulações aqui em análise. Maiores áreas de divergências associadas à simulação S2_7 são encontradas sobre o norte e leste do município de São Paulo, isso favorece que as regiões de convergência provocadas pela própria advecção associada aos movimentos descendentes e ao vento sinótico fiquem mais afastadas. No caso específico da simulação S2_7, áreas de convergência são localizadas mais ao norte da sub-região Norte da RMSP. Já sobre as sub-regiões Oeste e Sudoeste existem áreas menores de divergência em superfície, o que significa que ainda nessas áreas as células estão no final do estágio de maturidade começando o dispersar, o que explicaria o porquê de nesse horário serem as simulações S2_7 e S2_8 (que também desconsiderou a superfície urbana) as que apresentam maiores valores de hidrometeoros (Figura 5.18). A esta altura a brisa já fez seu papel importante no disparo da convecção e no aporte de umidade, ela não avança muito mais dadas as características de instabilidade e as tempestades presentes na região.

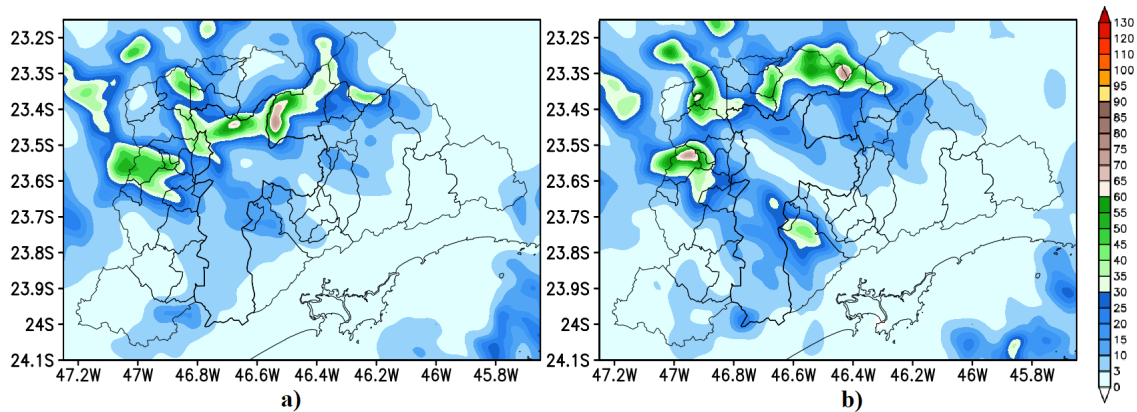
Figura 5.25 - Representação das áreas de divergência (fundo colorido, valor real multiplicado por 1000) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 18:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

A influência das mudanças das regiões de convergência está contida na precipitação registrada uma hora depois, às 19:00 UTC. Na Figura 5.26 é apresentada a precipitação total estimada pelo modelo entre as 18:00 e as 19:00 UTC. Nessa imagem se observa um deslocamento dos núcleos de máxima precipitação para a sub-região Norte no caso da simulação S2_7, justamente onde se localizava a área de convergência na hora anterior. Enquanto no CONTROLE_2 os maiores valores de precipitação estão localizados sobre norte de São Paulo e sudoeste de Guarulhos, no S2_7 estão sobre norte de Guarulhos e sobre Mairiporã na sub-região Norte da RMSP. O efeito das áreas de convergência deslocadas também é visto sobre a sub-região Sudeste. Para a simulação S2_7, valores de precipitação acima de 30 mm são estimados sobre São Bernardo do Campo e sul de Diadema, municípios pertencentes à sub-região mencionada anteriormente. Sobre Itapevi, na sub-região Oeste, a célula local agora em estágio dissipativo provocou maior acumulado de precipitação na S_7.

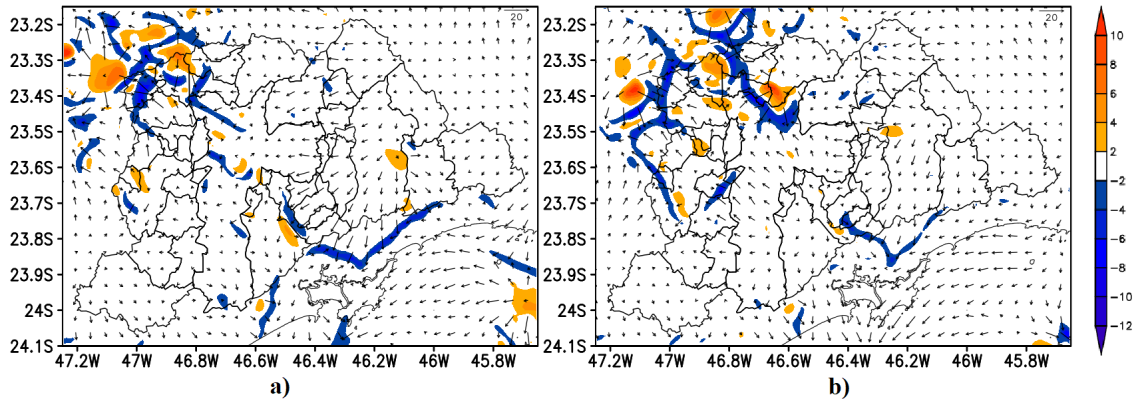
Figura 5.26 - Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 19:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

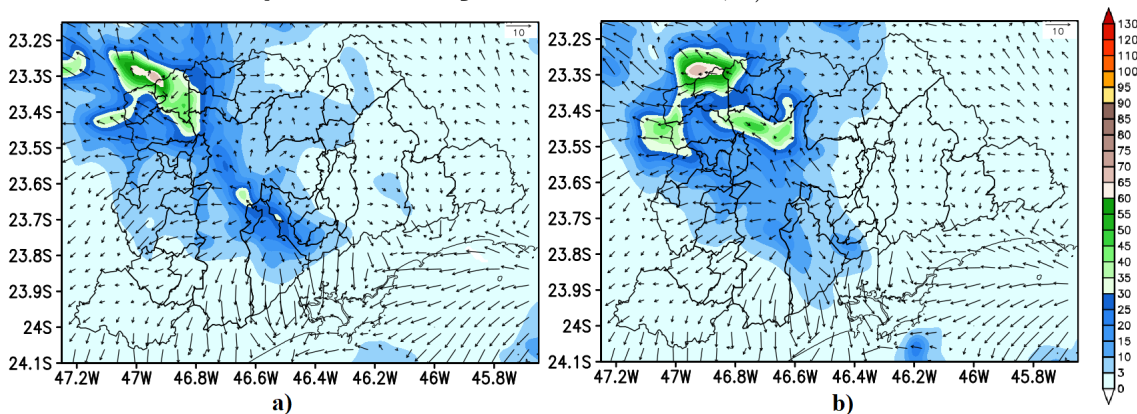
Na Figura 5.27 está a apresentação das áreas de divergência e convergência em superfície às 19:00 UTC do dia 24 de fevereiro, momento de maior precipitação na área escolhida para o estudo dos hidrometeoros. A localização das zonas de convergência e divergência é novamente determinada, em grande medida, pela localização e intensidade das células presentes. Na simulação CONTROLE_2 são observadas áreas de convergência dos ventos em superfície concentradas no extremo oeste da RMSP, enquanto que na S2_7, células em fase dissipativa com fortes correntes descendentes favorecem zonas de convergência sobre áreas maiores, principalmente na sub-região Sudoeste da RMSP. Assim é favorecido o surgimento de novas células que passam do estágio de cúmulo para o de maturidade, provocando chuvas intensas e altos acumulados como os observados às 20:00 UTC (Figura 5.28).

Figura 5.27 - Representação das áreas de divergência (fundo colorido, valor real multiplicado por 1000) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 19:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.28 - Representação do acumulado de precipitação horário (fundo colorido, mm acumulados em uma hora) e da direção e velocidade do vento em superfície (vetores, m/s) registrados no subdomínio que abrange a RMSP às 20:00 UTC do dia 24/02/2017. a) Estimativa associada à simulação de 1km de resolução do conjunto de simulações CONTROLE_2, b) Estimativa associada à S2_7.



Fonte: Produção do autor.

Nesta análise detalhada hora por hora, fica evidente que quando a convecção é associada a eventos de escala local a influência da superfície urbana é maior, mas muito complexa em relação a distribuição espacial dos núcleos de precipitação, pois se estabelece uma reação em cadeia de dissipação e intensificação das células convectivos que modifica configuração da precipitação de forma geral. O impacto resultante é determinado pelas características específicas da atmosfera no momento da instabilidade, pela configuração da mancha urbana e por outros fatores que dificultam em conjunto o estabelecimento de padrões gerais que descrevam esse impacto real.

6 APRIMORAMENTO DA REPRESENTAÇÃO DE EMISSÕES UTILIZANDO A FERRAMENTA PREP-CHEM-SRC

O processo de retroalimentação entre os aerossóis considerados pelo módulo de química CCATT e os utilizados na microfísica de nuvens é um trabalho futuro que permitirá melhorar o desempenho do modelo na previsão dos sistemas de tempo severo. De aí a necessidade de uma correta representação de todos os fatores relacionados com a química da atmosfera no sistema de modelagem, especialmente a emissão de poluentes.

Enfatizando a importância da correta representação das emissões das espécies químicas, principalmente dos aerossóis, é que se procedeu, como um dos objetivos do projeto de tese, à implementação de uma série de novas funcionalidades na ferramenta PREP-CHEM-SRC encarregada de processar a emissão utilizada pelo CCATT-BRAMS-JULES. Portanto, neste Capítulo vai se apresentar e descrever essas novas implementações.

Esta etapa do trabalho trata do desenvolvimento numérico visando gerar estimativas de emissões urbanas de poluentes, tomando como referência a malha viária, e também representar de forma adequada as emissões das partículas aerossóis de relevância para o estudo.

A seguir serão descritas as modificações feitas no PREP-CHEM-SRC, especificamente em cada módulo que foi preciso modificar para conseguir o resultado final. Também são apresentadas as considerações relacionadas com a forma como o processo implementado funciona e como deve ser a interação do usuário com esse processo, e com a ferramenta de forma geral.

6.1 Funcionalidades implementadas na ferramenta PREP-CHEM-SRC.

O preprocessor de emissões PREP-CHEM-SRC é uma ferramenta para a preparação dos campos de emissões para uso nos modelos regionais e globais de previsão do tempo e qualidade do ar. Considera fontes de poluição urbanas/industriais, biogênicas, por queima de biomassa e vulcânicas. Os dados de saída desta ferramenta são utilizados pelo sistema de modelagem BRAMS (FREITAS *et al.*, 2017) e também pelo WRF/Chem.

O objetivo deste trabalho é melhorar na representação das emissões antropogênicas de poluentes utilizando a ferramenta PREP-CHEM-SRC, isto é, melhoras que permitam aprimorar a representação das concentrações de diferentes espécies químicas nas grandes regiões urbanas, principalmente do material particulado. Sendo que, para isso, centrou-se a atenção na distribuição da emissão veicular por vias (DVM), o que de forma intrínseca aporta outras melhorias na representação geral das emissões, portanto, levando a um resultado mais realista e ideal das simulações das condições química da atmosfera, especialmente em cenários de maior resolução espacial.

Nos Capítulo 3 foram descritos os processos que antecederam à implementação da capacidade de distribuição de emissões por vias na ferramenta PREP-CHEM-SRC, fala-se do processamento dos dados de emissão e de malha viária nos diferentes municípios que conformam a área de estudo. A implementação consistiu na modificação e introdução do código de programação na ferramenta anteriormente mencionada. Foi necessário criar uma nova sub-rotina para fazer a distribuição e ao mesmo tempo modificar e adaptar outras já disponíveis para acoplar os diferentes processos.

6.1.1 Modificações e novo código programado no PREP-CHEM-SRC.

As emissões originais de fontes urbana e industrial são contabilizadas de bases de dados como RETRO (*Reanalysis of the Tropospheric chemical composition*), EDGAR (*Emission Database for Global Atmospheric Research*) e GOCART (*Geórgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model*), das quais se falou anteriormente. As emissões provenientes destes inventários são interpoladas para as grades do modelo usando o esquema do vizinho mais próximo.

A continuação a explicação sobre o que foi feito em cada um dos módulos do código fonte do PREP-CHEM-SRC com os quais se trabalhou. Esses módulos encontram-se dentro da pasta */src*. Ao mesmo tempo que são descritas as modificações e novas funcionalidades é possível entender melhor o processo em si de distribuição de emissões por vias.

- Módulo **prep_chem_sources_utils.f90**.

Neste módulo foram realizadas pequenas modificações. É nele que encontram-se as sub-rotinas auxiliares de cálculo que permitem interpolar os valores nos pontos da grade principal de emissões utilizando outros valores assinados a pontos específicos ou áreas dentro da mesma grade. Essas sub-rotinas são denominadas *update_emissions_by_city* e *update_emissions_by_point*. As modificações aqui foram mais relacionadas com formato dos dados de saída, além de avisos que permitam ao usuário conhecer se determinada cidade ou ponto não está sendo considerado para a distribuição de emissão por estar fora do domínio da simulação.

- Módulo **util_geometry.f90** (sub-rotinas *loadMobileSrcMap* e *polyToModel*)

Neste módulo encontram-se dois das sub-rotinas que dão suporte ao processo de distribuição por vias de mobilidade: sub-rotinas *loadMobileSrcMap* e *polyToModel*. Ambas foram modificadas para que respondessem de forma satisfatória à nova funcionalidade que foi implementada e ao objetivo específico que é melhorar os dados de emissão urbana gerados pelo PREP-CHEM-SRC, principalmente do material particulado. As duas sub-rotinas chamam a outras sub-rotinas mencionadas no módulo anterior.

O PREP-CHEM-SRC possui também um sistema de inclusão de dados locais de emissão, estes são interpolados no domínio de estudo usando um esquema de interpolação chamado *delimitado por área*. A metodologia foi criada e implementada por ALONSO (2011), e utiliza um arquivo ASCII (*SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*) onde são especificados valores de emissão anual de CO e NO_x para 337 municípios do Brasil (entre eles a maioria dos da RMSP), além de incluir cidades de outros países de América Latina, como Peru e Argentina. Esses valores anuais de emissão são distribuídos pela ferramenta de forma igualitária para cada dia do ano e de forma homogênea na área que ocupa cada município especificado no arquivo (DHM). Nesse processo são utilizadas também as duas sub-rotinas mencionadas anteriormente e que foram modificadas de forma tal que não afetasse essa funcionalidade.

No caso da sub-rotina *loadMobileSrcMap*, ela foi adaptada para sempre ler os dados presentes nesse arquivo ASCII correspondentes não só às espécies químicas CO, NO_x e sim também de compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC) e MP inalável. No entanto, foi deixada uma *flag* que, no caso de ser ativada, não vai ser lida a espécie MP; isso foi necessário para não interferir na implementação feita por Gacita (2011) para a distribuição de emissões em Cuba, onde se faz a leitura de um arquivo específico preparado pela autora.

Já na sub-rotina *polyToModel*, encarregada de processar os dados de emissão locais lidos do arquivo ASCII, as modificações foram principalmente vinculadas com o processamento também de NMVOC e MP inalável. Nesta sub-rotina uma grade secundária, com as mesmas dimensões da principal processada pela ferramenta, é criada. Ela é inicialmente zerada e posteriormente preenchida com os dados de emissão locais lidos utilizando *loadMobileSrcMap*, sem modificar as unidades de medidas desses valores de emissão. Cada cidade que esteja presente no arquivo ASCII e ao mesmo tempo inclusa no domínio de simulação, é dividida em pixels com resolução definida dentro da sub-rotina, posteriormente o valor total de emissão é distribuído entre a quantidade total de pixels e interpolado aos nodos da grade secundária com ajuda da sub-rotinas *update_emissions_by_city*. Nesse processo de interpolação, dada a distribuição dos pixels nas áreas das cidades e a configuração dos nodos da grade, cada um desses nodos pode receber informação de emissão de vários pixels e até mesmo sendo estes de cidades diferentes que sejam próximas (vai “acumulando” esses valores). É essa última situação que provoca que em nodos localizados sobre áreas internas do município, onde o processo de interpolação denominado *delimitado por área* utiliza só os pixels do mesmo município para calcular o valor no nodo, tenham valores iguais e em nodos mais próximos dos limites os valores sejam heterogêneos (por essa situação o esse processo será denominado doravante de quase-homogêneo).

Outra situação que foi preciso resolver esteve relacionada com o fato de ter-se modificado o código para permitir ao usuário incluir municípios no processamento de dados locais sem necessidade de ter disponíveis todas as informações de emissão para as 4 espécies químicas consideradas. No caso dos nodos da grade que ficam nos limites de um município que tem fronteira com outro onde o valor de determinada emissão não esteja disponível, e por tanto o valor lido do arquivo ASCII vai ser -999, o processo de interpolação ia causar ruídos nos valores finais. É por esse motivo que o código desta sub-rotina teve também que ser modificado para que nessa situação esses nodos da grade secundária sempre fiquem sem informação para a espécie química correspondente, na pratica isso significa que aqueles nodos que deveriam ter influencia de pixels com valores -999 fiquem também com esse valor mesmo que eles estejam localizados sobre outros municípios (nesse caso sempre nos limites).

No final se obtém uma grade secundária com valores de emissão local das espécies mencionadas as cidades disponíveis e os restantes nodos da grade ficam com valor zerado. Com as novas linhas de código introduzidas, o processo agora é feito também para as espécies NMVOC e MP inalável. Em caso do usuário querer aumentar as emissões, de qualquer dessas espécies, na mesma proporção para todos os municípios contidos no arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*, basta modificar o parâmetro que foi incluso para esse fim nesta sub-rotina e compilar novamente o código.

Também na sub-rotina *polyToModel* foi eliminada a obrigatoriedade de se ler dados positivos para a emissão da espécie química CO, o que se manteve de forma análoga para NMVOC e MP inalável. No caso de NO_x é preciso que no arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* se tenham valores maiores que zero de emissão declarado para essa espécie. Essa condição está justificada na explicação das modificações feitas no módulo a seguir.

- Módulos **retro__emission.f90** e **edgar__emissions.f90**

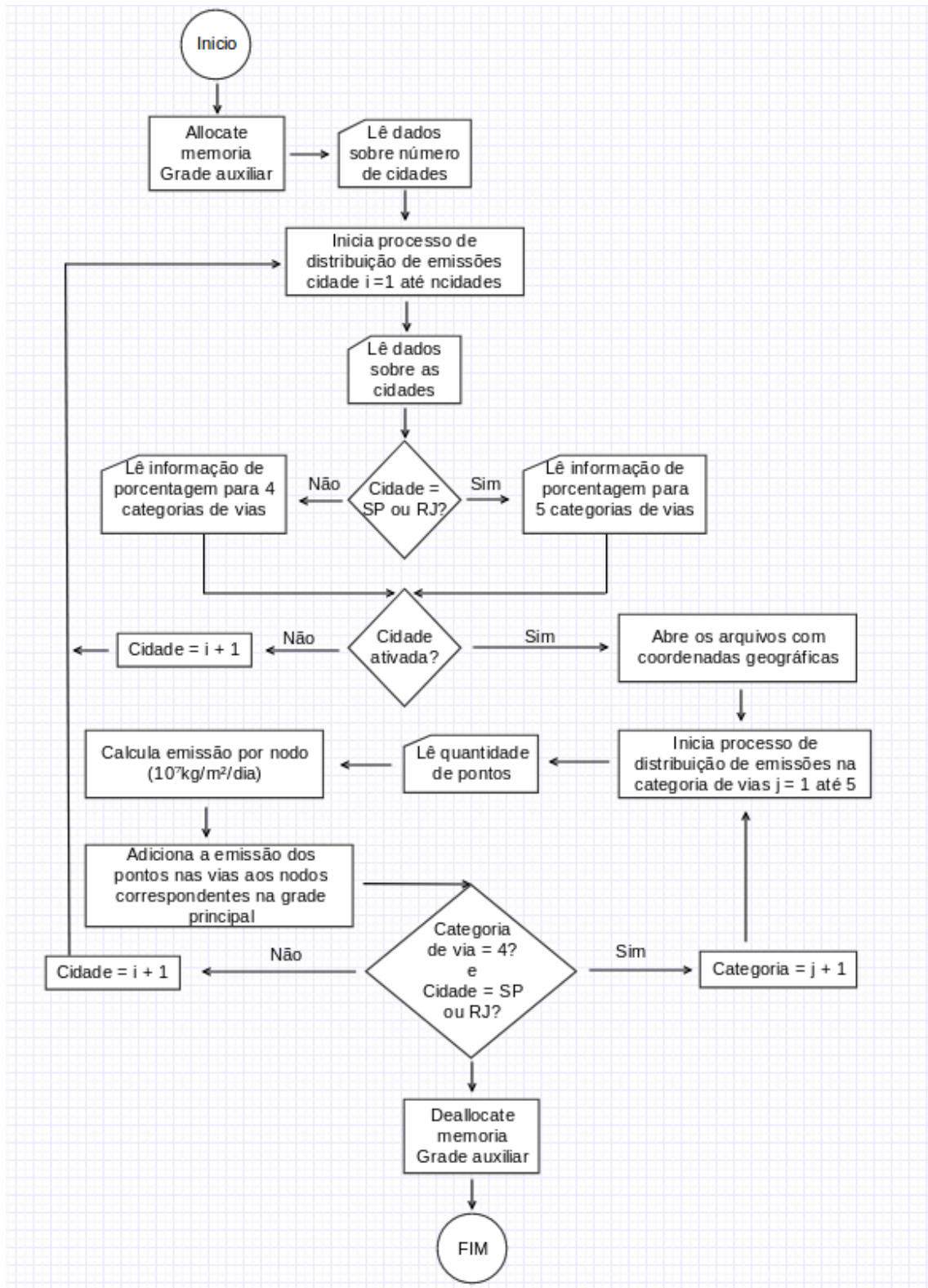
São estes dois módulos que contêm toda a programação encarregada dos processos de leitura dos dados das bases globais de informações respectivas (RETRO e EDGAR) e interpolar esses valores de emissão antropogênica na grade principal onde está contida a informação de todos os tipos de emissões. É por isso que é neles também que se decidiu inserir o algoritmo encarregada diretamente do processo de distribuição das emissões veiculares por vias de mobilidade. Em cada um dos módulos os códigos modificados ou inclusos são os mesmos mas adaptados às variáveis empregadas para manipular cada base de dados global (BDG).

Na Figura 6.1 pode-se observar fluxograma da sub-rotina de distribuição por vias. De forma geral, o algoritmo permite a leitura da informação associada a cada município em relação com a emissão veicular, porcentagem de emissão, em relação com o total, para cada categoria de vias e coordenadas geográficas dos pontos sobre as vias para fazer a distribuição dessa emissão que é adicionada à que já está armazenada na grade principal de emissões antropogênicas. Se considera o fato de que São Paulo têm 5 tipos diferentes de categorias de vias e o restante da RMSP só 4 (o processo também foi implementado anteriormente para o município de Rio de Janeiro com 5 tipos de vias, (CHOVERT, 2016)). Por enquanto é possível processar de forma direta as emissões veiculares vinculadas às espécies CO, NO_x e MP inalável. Para as outras espécies se realiza um balanço a partir da razão de proporção dos NO_x, isso é, se calcula a razão entre o valor em cada nodo obtido utilizando os dados locais (nas vias) e os da base de dado global, posteriormente esse valor é multiplicado aos valores das emissões, no mesmo ponto, das outras espécies químicas consideradas pelo mecanismo químico selecionado pelo usuário (para esta pesquisa RELACS_TUV). Esse balanço é aplicado também nas espécies CO e MP inalável em aquelas áreas onde os valores de emissão correspondentes não estiverem disponíveis.

Foi incluso também, na nova sub-rotina, um parâmetro que pode ser utilizado para modificar a emissão veicular associada a cada município e espécie de forma simultânea, sem necessidade de modificar o arquivo com os dados de entrada, isso permite fazer testes com diferentes cenários de emissão calculados comumente para grandes áreas e não para municípios específicos (lembrar que é necessário compilar o código novamente ante cada modificação desse parâmetro)

Outra modificação que foi feita nestes módulos tem a ver com o processo de distribuição de emissões por cidades. No caso desse processo ser ativado, existe uma sub-rotina nestes módulos que faz a troca do valor obtido a partir da informação na base de dados global pelo valor calculado no mesmo nodo e guardado numa grade auxiliar durante a execução da sub-rotina *polyToModel*. Esse processo de substituição de valor é feito só onde realmente se tem cidade já que o restante dos nodos vai estar com valor zerado na grade auxiliar ou secundária como foi explicado anteriormente. Para identificar esses nodos o modelo verifica a emissão de NO_x, e está aqui a justificativa de por que esse valor não pode ser zerado ou negativo no arquivo ASCII, ele serve como identificador de nodos onde existem valores determinados com emissão local. A variação dos NO_x é também utilizada para restabelecer o balanço nos valores de emissão das outras espécies química, neste caso em todos os pontos com influência de emissões locais (cidades).

Figura 6.1 - Fluxograma geral do algoritmo da sub-rotina encarregada da distribuição das emissões por categorias de vias de tráfego.



Fonte: Produção do autor.

6.1.2 Novas opções e considerações relacionadas com o processo implementado de distribuição de emissões, na perspectiva do usuário.

A nova funcionalidade implementada traz junto algumas modificações no procedimento que o usuário precisa seguir para conseguir executar a ferramenta PREP-CHEM-SRC e obter resultados com influência de emissão local, seja por vias de mobilidade, por cidades ou ambas. Neste item são descritas as formas pelas quais o usuário pode interagir com o novo processo e algumas das considerações relacionadas.

O *namelist* do PREP-CHEM-SRC foi modificado, nesta nova versão o parâmetro destinado a indicar se a distribuição para o município de São Paulo deve ou não ser feita foi adaptado para o processo de distribuição por vias de forma geral. O usuário tem a opção de indicar se quer fazer o uso (incluindo o nome do arquivo com as informações vinculadas a cada município (*EmissionRoadCities.dat*)); ou não da funcionalidade (colocando *NONE*). Na Figura 6.2 é apresentada a seção do *namelist* com a modificação.

Figura 6.2 - Fragmento do *namelist* utilizado no PREP-CHEM-SRC com o parâmetro de controle associado ao processo de distribuição por vias de tráfego em áreas urbanas.

```
!----- Inventory of emissions by roads
! Enables Local inventory information by roads
! Use 'NONE' or leave it blank to not use distribution of
emissions by roads
! Use 'EmissionsRoadCities' for distribution of emissions
by roads
streets_inventory_region = 'EmissionsRoadCities',
```

Fonte: Produção do autor.

O arquivo de texto *EmissionRoadCities.dat* junto com o já mencionado arquivo ASCII (denominado *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*), são os dois arquivos que o usuário deve modificar segundo as necessidades de cada simulação. É neles que são colocadas uma série de informações necessárias para a realização do processo de distribuição de emissões locais, seja por vias ou de forma quase-homogênea nas cidades. A importância desses arquivos não está apenas no fato de permitir ao usuário mexer com os dados de forma direta, mas também pela possibilidade de isso ser feito sem precisar compilar novamente o código pois este não está sendo modificado. Ambos arquivos estão localizados nas pastas */extra/UserData/Road* o primeiro e */extra/UserData* o segundo, isso dentro da pasta principal da ferramenta PREP-CHEM-SRC.

O arquivo *EmissionRoadCities.dat* está relacionado exclusivamente com o processo de distribuição das emissões por vias que foi implementado e está sendo apresentado neste relatório. Ele não existe nas versões antigas do PREP-CHEM-SRC. O formato desse arquivo é apresentado na Figura 6.3. Observa-se que o primeiro valor se refere ao número de municípios a ser processados, posteriormente os dados associados a cada um. É aqui que são colocados os valores calculados, no primeiro Capítulo, de emissão veicular municipal, tomando como referência o ano de 2016. Por enquanto as espécies químicas incluídas são CO, NO_x e MP inalável seja na moda fina (MP2,5, tratado na ferramenta com o nome de URBAN2), na moda grossa (MP25_10) ou total (MP10T, tratado na ferramenta com o nome de URBAN3)

Entre as opções que tem o usuário estão as de colocar valor -999 em caso do dado de emissão não estar disponível ou preferir que a fonte deste seja diferente do dado local, também existe um parâmetro que permite ativar ou desativar, sem necessidade de apagar a informação, o processamento da informação associada a determinado município. A resolução dos dados georreferenciados e os valores de porcentagem de emissão veicular para cada categoria de vias e município, abordados nos itens 3.7.2 e 3.7.1 respectivamente, também são especificados neste arquivo. Importante destacar que a unidade de medida de todos os dados de emissão colocados em *EmissionRoadCities.dat* deve ser 10⁷ kg/m²/ano, também que as siglas de cada município (três letras) são as mesmas que estão presentes nos nomes dos arquivos de dados com as coordenadas dos pontos.

Figura 6.3 - Formato e exemplo do arquivo *EmissionsRoadCities.dat*.

```
nCities
nameCity regionCity acronymCity ativateCity
resolCity
COCity NOxCity PM25City PM25_10City PM10City
percentRoad(Str) percentRoad(Pri) percentRoad(Local) percentRoad(Sec or Sec-Col) percentRoad(Col)
-----
40
RioDeJaneiro RMRJ RJM 1
200
2.7832 2.4637 -999 -999 0.2063
14 6 56 7 17
SaoPaulo RMSP SPA 1
200
8.0291 3.0968 -999 -999 0.0844
8 11 51 12 19
Aruja RMSP ARU 1
200
0.0522 0.0343 -999 -999 0.0010
23 25 31 21
BiritibaMirim RMSP BIM 1
200
0.0121 0.0061 -999 -999 0.0002
22 5 43 30
FerrazDeVasconcelos RMSP FDV 1
200
0.0673 0.0288 -999 -999 0.0008
1 38 52 9
```

Fonte: Produção do autor.

Em relação ao arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*, este está associado ao processo de distribuição de emissões de forma quase-homogênea nos municípios (DQHM) e que já foi explicado anteriormente. Já estava presente nas versões anteriores do PREP-CHEM-SRC e foi utilizado para complementar a atual implementação de distribuição por vias. No *namelist* existem dois parâmetros de controle associados com o ASCII, o primeiro para dar o caminho da pasta onde ele está guardado e o segundo para colocar o nome em caso de se querer utilizar esse processo ou a palavra *NONE* em caso da não utilização. Um exemplo do formato pode ser observado na Figura 6.4.

Figura 6.4 - Exemplo do arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*, que inclui as informações referentes às emissões que serão distribuídas por município.

```

337
RIOBRANCO - AC
 9034.731      44.25082
  2.008011     0.2235028   -999   -999
-69.36400     -10.48500     -67.48200   -9.505000
 19
-67.79549     -10.00453
-67.83714     -9.979527
-67.84547     -9.971193
-67.85381     -9.962860
-67.85381     -9.954527
-67.85381     -9.946194
-67.82881     -9.929527
-67.82048     -9.929527
-67.81215     -9.929527
-67.80382     -9.929527
-67.79549     -9.937860
-67.78716     -9.946194
-67.78716     -9.954527
-67.78716     -9.962860
-67.78716     -9.971193
-67.78716     -9.979527
-67.78716     -9.987860
-67.78716     -9.996193
-67.79549     -10.00453

```

Fonte: Produção do autor.

A primeira variável no arquivo é o número de municípios a ser processado, posteriormente os dados de cada um deles começando pelo nome e siglas do estado em que se encontra. Na segunda fila depois do nome são especificados os valores das emissões que vão ser distribuídos de forma quase-homogênea na área que ocupa o município, área que é definida por uma série de coordenadas dos limites do polígono que de forma aproximada cobre o município (presentes também no arquivo) . A ordem das espécies químicas às quais pertencem os valores de emissão é a seguinte: CO, NO_x, NMVOC e MP inalável, igual ao caso anterior, ante a falta de informação ou necessidade de não ser utilizados os valores locais deve ser colocado -999 no lugar da emissão. Isso só não pode ser feito para as emissões de NO_x pelo motivo explicado no Item 6.1.1. A unidade de medida dos valores de emissão é 10⁷ kg/m²/ano.

Como foi dito, o arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* foi modificado e utilizado de forma complementar no novo processo de distribuição por vias. As modificações consistem na introdução dos dados de emissão de NMVOC e MP inalável e a atualização dos valores correspondentes às espécies CO e NO_x criando-se três versões diferentes (total [veicular + industrial], industrial, zerado). A forma na qual esse arquivo, em distintas versões, é utilizado ante as diferentes necessidades do usuário é descrita a seguir:

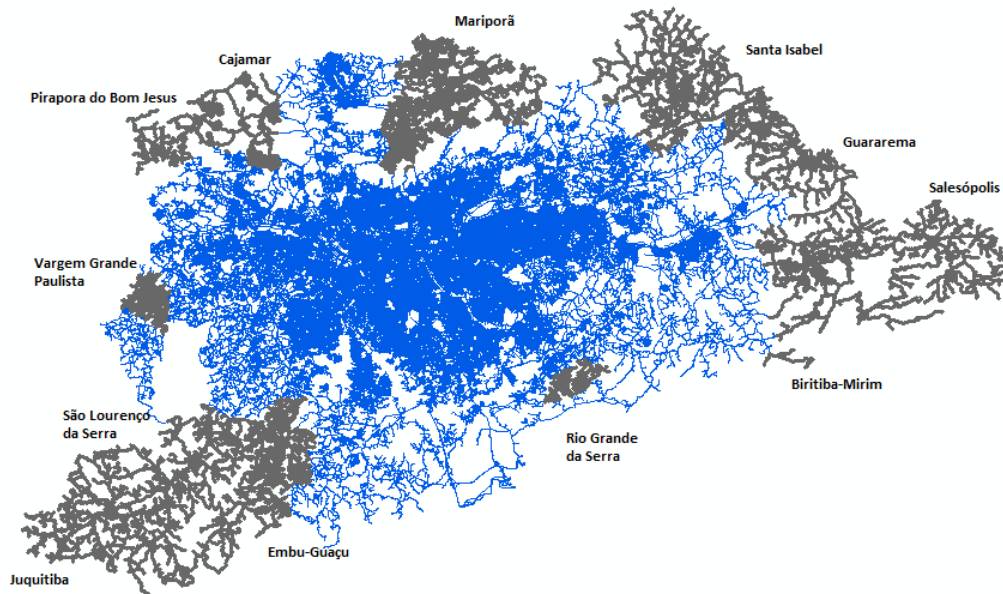
- **Necessidade 1:** Utilizar só os dados da base global de emissões antropogênicas (RETRO, EDGAR ou ambas). Nesse caso os parâmetros de controle associados aos processos de distribuição de emissões locais devem estar com a opção *textitNONE*, ambos arquivos (*SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* e *EmissionRoadCities.dat* são ignorados pela ferramenta).

- **Necessidade 2:** Utilizar o processo de distribuição de emissões de forma quase-homogênea por municípios e não o relacionado com vias. Nesse caso a versão a se utilizar deve ser o arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions_total.dat* (nome especificado no parâmetro de controle), nele estão os valores totais de emissão antropogênica (veicular + industrial) por município para as espécies químicas incluídas, calculados utilizando os dados da CETESB (ver Item 3.2.1). Como uma segunda opção dessa versão foi deixado o arquivo original (*SA_citiesMobileUrbanEmissions_total_original.dat*) criado pelo (ALONSO, 2011) e que contém apenas dados de emissões para CO e NO_x calculados tomando como referência o ano de 2005 e distribuídos utilizando como peso a quantidade de veículos por quilômetro quadrado. Para os municípios dentro do domínio de simulação que não estejam contidos no arquivo serão utilizados os dados da base global especificada no *namelist*. O arquivo *EmissionRoadCities.dat* é ignoradas (opção *NONE*). O balanço das emissões das outras espécies químicas é feito aplicando a razão de variação do NO_x que foi explicada anteriormente.

- **Necessidade 3:** Utilizar de forma simultânea os processos de distribuição de emissões de forma quase-homogênea por municípios e por vias de mobilidade. Nesse caso a versão a se utilizar deve ser o arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions_industry.dat* (nome especificado no parâmetro de controle), nele estão os valores totais de emissão antropogênica para os municípios que não estão implementados nos processos de distribuição por vias e os valores associados à indústria, calculados também utilizando os dados da CETESB, naqueles que sim estão implementados na distribuição por vias. Para aqueles municípios que não estão inclusos nem na distribuição por cidades nem na feita considerando as vias, os valores serão tomados das bases de dados globais. Para que o processo seja lógico, se a espécie química específica tem valor definido na emissão por vias então deve ter também na emissão industrial pois assim se evita superestimação ao ser somada ao valor da base de dado global a emissão por vias. Caso se tenha emissão industrial e não disponível a emissão veicular, o resultado final será subestimado. Vale destacar nesse sentido que existem 12 municípios da RMSP que não estão registrados em nenhuma das versões do arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* e por tanto fazer a distribuição por vias das emissões que são adicionadas às das bases de dados globais para a mesma região resulta em superestimação (ver Figura 6.5).

No entanto, considerando que a malha viária nesses 12 municípios representa, aproximadamente, menos de 8% do total da RMSP e as emissões menos do 3%, o erro é quase insignificante comparado com o um ganho em relação à representação espacial. A razão de variação do NO_x é aplicada também nas espécies não incluídas diretamente no processo de distribuição, tanto para os nodos da grade principal dentro dos municípios como aqueles associados aos pontos sobre as vias.

Figura 6.5 - Região Metropolitana de São Paulo. Em azul logradouros dos municípios incluídos no arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*. Em cinza logradouros dos municípios não incluídos no arquivo.



Fonte: Produção do autor.

- **Necessidade 4:** Utilizar o processo de distribuição de emissões veiculares por vias e não o de distribuição quase-homogênea por cidades. Nesse caso a versão a se utilizar deve ser o arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions_annulled.dat* (nome especificado no parâmetro de controle), nele estão incluídos apenas os municípios contemplados na distribuição por vias e com os valores das emissões zeradas para todas as espécies menos para o NO_x que não pode ser igual ou menor que zero (ver Item anterior) e por tanto toma valor quase nulo ($0,1 \cdot 10^{-8}$). Essa estratégia assegura que nos municípios com distribuição por vias não existirá emissão antropogênica de outras fontes como são as bases de dados globais. As emissões das espécies não tratadas de forma direta são quase anuladas a partir da utilização da razão de proporção do NO_x naqueles municípios processados e, especificamente, nos nodos sem influência de emissão veicular nas vias, pois nestes a mesma razão é aplicada só que dessa vez utilizando não o valor quase nulo e sim o correspondente a essa emissão veicular associada. As bases de dados globais são utilizadas para os restantes municípios incluídos no domínio de simulação.

Na Tabela 6.1 é mostrado um resumo das necessidades apresentadas anteriormente onde se especifica a versão do arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* a ser utilizada e suas características.

Tabela 6.1 - Exemplos de situações configuradas pelo usuário e versões com as características do arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* a ser utilizado em cada caso.

Fonte de dados	Versão a utilizar do arquivo	Características do arquivo
BDG	Não se utiliza	-
BDG + DQHM	<i>SA_citiesMobileUrbanEmissions_total.dat</i>	Arquivo contendo informação das emissões totais antropogênicas para todos os municípios implementados.
BDG + DQHM + DVM	<i>SA_citiesMobileUrbanEmissions_industry.dat</i>	Arquivo contendo informação de emissões industriais para os municípios incluídos no processo de distribuição por vias e emissões totais antropogênicas para os restantes municípios.
BDG + DVM	<i>SA_citiesMobileUrbanEmissions_annulled.dat</i>	Arquivo contendo informação só para os municípios que também estão incluídos no processo de distribuição por vias. As emissões estão zeradas.

Outras necessidades diferentes das aqui explicadas devem ser analisadas e configuradas pelo usuário. Em todos os casos onde o arquivo *EmissionRoadCities.dat* seja utilizado, ele deve conter a informação de emissão veicular associada aos municípios.

Lembrando que apesar de ter sido implementada a leitura direta dos valores de emissão local de NMVOC para a distribuição de forma quase-homogênea por municípios, estes por enquanto não estão sendo processados. O trabalho com os NMVOC é mais complexo pois requer de informação particionada das emissões dos diferentes tipos de VOC na região de estudo, isso considerando também que existem variações entre os mecanismos químicos empregados pelos modelos ambientais para tratar estas espécies. A implementação foi feita pensando num futuro desenvolvimento mas não é objetivo principal desta pesquisa.

Outra consideração está relacionada com o domínio de simulação. Se a área que ocupa o município é cortada pelas bordas desse domínio então o processo de distribuição quase-homogênea não é feita mesmo que os dados correspondentes estejam disponíveis no arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat*. Isso pode causar por exemplo uma superestimação em caso de ser utilizada a distribuição de emissões por vias pois esse processo será realizado em aqueles pontos das diferentes categorias de vias que fiquem dentro do domínio sem importar se estão sendo cortados em parte para o município. Nesse caso além da emissão por vias, será contabilizada também a emissão das bases de dados globais que já incluem emissão veicular nos seus dados.

Pela importância que representam para a pesquisa geral e especificamente para a parte que está sendo apresentada neste relatório, a seguir são descritos os aspectos específicos relacionados com a forma em que é feita a distribuição das emissões antropogênicas de Material Particulado primário na nova versão da ferramenta PREP-CHEM-SRC apresentada aqui:

- Num primeiro momento os valores de URBAN2 e URBAN3, que são as variáveis que definem o MP2,5 e MP10T respectivamente, são calculados e colocados na grade principal de emissões a partir de uma parametrização dependente das concentrações de CO. Então se os processos de distribuição de emissões locais descritos anteriormente não forem utilizados é com essa parametrização que serão calculadas as emissões de MP inalável (CO das bases de dados globais).

Emissão de MP2,5 = $[(1/(28 \cdot 10^{-3})) \cdot \text{Emissão de [CO]mol(CO)/m}^2/\text{dia} \cdot (2.95 \cdot 10^{-3})]$ kg(MP25)/m²/dia

Emissão de MP10T = $[(1/(28 \cdot 10^{-3})) \cdot \text{Emissão de [CO]mol(CO)/m}^2/\text{dia} \cdot (8.77 \cdot 10^{-3})]$ kg(MP10)/m²/dia

- Quando apenas o processo de distribuição de emissões de forma quase-homogênea por municípios é ativado, o MP inalável para aquelas cidade que não estão no arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* é obtido com a parametrização mostrada anteriormente e o valor de emissão de CO disponibilizado pela base de dado global. Com a nova implementação da leitura direta de dados locais de MP surgiram várias situações, a primeira é ter efetivamente um valor, seja total antropogênico, industrial ou zero, para a emissão de MP. Nesse caso a distribuição se faz de forma quase-homogênea (sendo que ficou definido que do valor total da emissão de PM10, 35% correspondem a PM2,5). A segunda situação é não ter valor disponível de emissão de MP para o município (aparece -999 como definido anteriormente), nesse caso as emissões desta espécie seguem sendo calculadas utilizando a parametrização do CO. Então, se tiver dado local de emissão de CO, é esse o dado a utilizar-se na parametrização, mesmo sendo zero (o que zeraria também a emissão de MP); se não tiver dado de CO e nem de MP disponível então o cálculo é feito para esse município presente no arquivo *SA_citiesMobileUrbanEmissions.dat* utilizando o CO da base de dado global com a correção feita para essa espécie química a partir da razão de variação do NO_x .

- Quando o processo de distribuição por vias é ativado, os procedimentos são parecidos. O valor colocado no arquivo *EmissionRoadCities.dat* é lido diretamente para distribuir nos pontos que conformam as vias, mas nesse arquivo podem ser especificados tanto o PM2,5 e PM2,5-10 como o PM10T. Dependendo de qual informação esteja sendo disponibilizada pelo usuário o programa faz o processamento para determinar URBAN2 e URBAN3, para isso, quando necessário, utiliza as porcentagens 35% e 65% da emissão total de PM10 como estimativa da emissão do PM2,5 e de PM2,5-10, respectivamente (valores estabelecidos até a validação). Se nenhum dos três valores estiverem declarados então se utiliza a parametrização dependente do CO com o valor de emissão dessa espécie lido do arquivo de dados *EmissionRoadCities.dat* ou da base de dado global utilizada (em caso de não estar também disponível a emissão de CO veicular).

Por *default*, a ordem na qual os processos vão ser feitos se estiveram ativados é: primeiro leitura de dados da base global, logo a distribuição quase-omogênea dos valores locais de emissão e finalmente a distribuição nos pontos que ficam sobre as vias de mobilidade, no caso dos dois últimos, apenas naqueles municípios implementados e ativados. As considerações apresentadas anteriormente sobre o MP inalável se aplicam em cada processo na forma descrita independentemente de se outro processo de distribuição estiver ou não ativado.

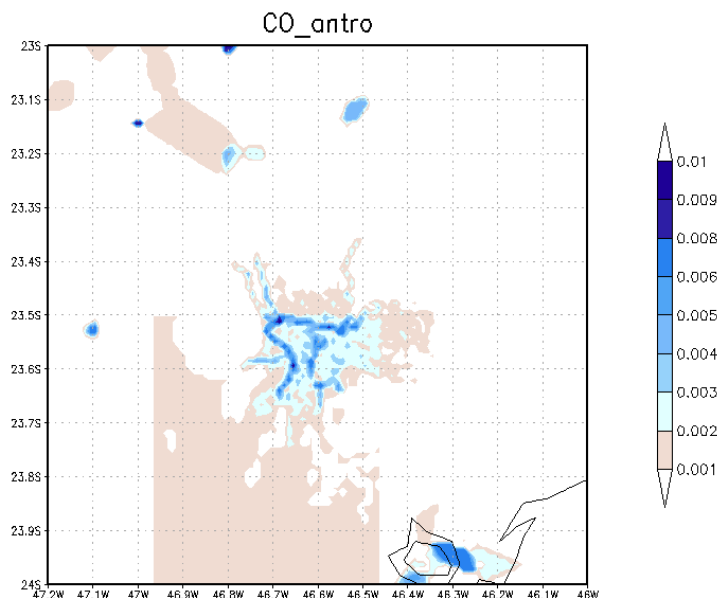
Por último dizer que o arquivo *EmissionRoadCities.dat default* contém os valores de emissão de MP inalável total para todas as cidades caracterizadas nele, esses valores foram obtidos a partir dos processos descritos no Item 3.7.3.

6.1.3 Resultados preliminares utilizando o distribuição de emissões considerando a malha viária.

Como foi apresentado anteriormente, dois conjuntos de simulações foram constituídos (CS1_SV, CS1_CV) com o CCATT ativado para verificar os primeiros resultados ao utilizar a nova funcionalidade do PREP-CHEM-SRC que considera a malha viária para a geração das emissões. As simulações consideraram o período entre as 00:00 UTC do dia 08/06/2017 e 00:00 UTC do dia 10/06/2017, depois do evento extremo de precipitação tratado neste trabalho.

Os dados de emissão contêm a influência das vias e é possível ver valores maiores naquelas caracterizadas como Estruturais. Na Figura 6.6 um exemplo da representação das emissões, nesse caso para o CO antropogênico. No centro da imagem, delimitando boa parte da mancha urbana, os valores mais elevados de emissão e destacam as marginais Pinheiro e Tietê no município de São Paulo.

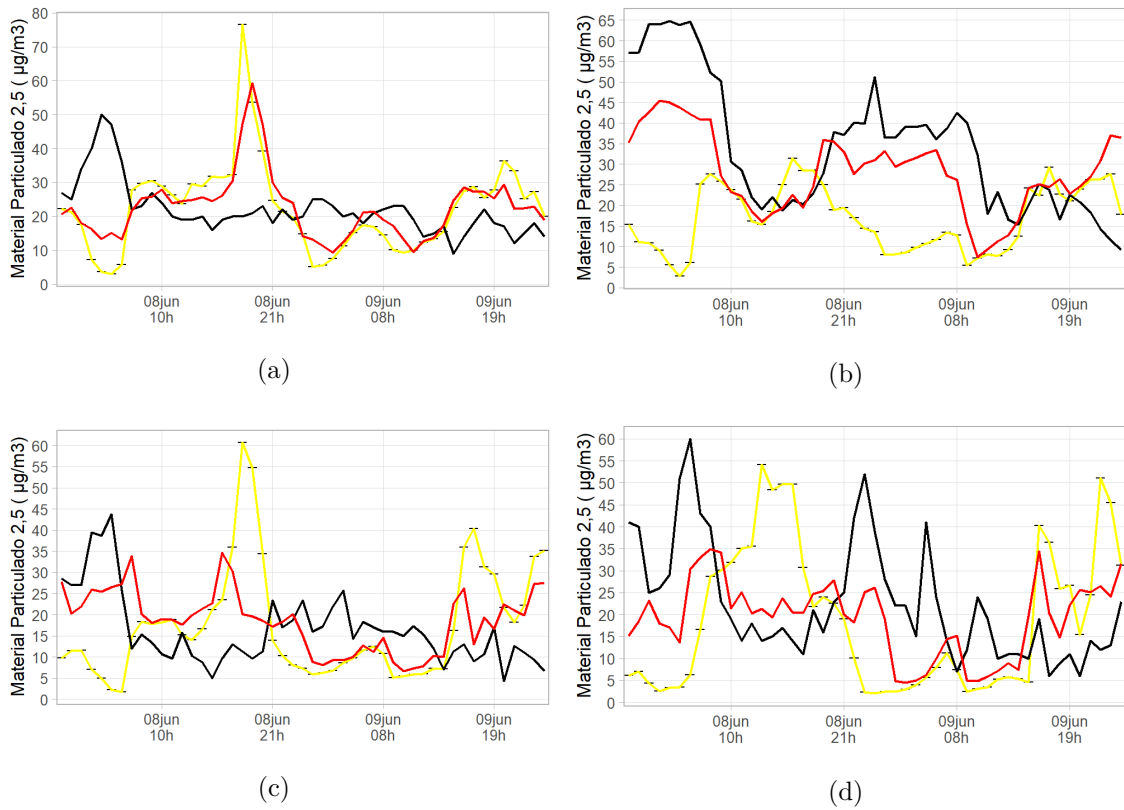
Figura 6.6 - Exemplo da distribuição de CO antropogênico (com valores aumentados) utilizando a ferramenta PREP-CHEM-SRC modificada de forma tal que considera a malha viária na RMSP. Valores de emissão em kg/m^2 .



Fonte: Produção do autor.

Os resultados das simulações mostraram melhoras na estimativa das concentrações de MP2,5. Na Figura 6.7 a representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável MP2,5 em 4 subáreas (1, 2, 3 e 6) (Figura 3.8). Se observa que nas subáreas com mais superfície urbana (subáreas 2 e 3) a melhora é mais significativa. Na Tabela 6.2 os valores dos índices estatísticos associados a cada simulação e obtidos na comparação com os dados observados das estações da CETESB. Em todos os casos o REQM e CC melhorou quando se considerou a distribuição por vias de mobilidade. Apesar de ser uma avaliação inicial já foi possível identificar a melhora no desempenho do modelo ao estimar as concentrações de MP2,5. Estudos mais profundos considerando outras variáveis da química atmosférica serão necessários para validar na sua totalidade a nova implementação.

Figura 6.7 - Representação gráfica dos valores médios horários observados e simulados para a variável MP2,5. Linha preta indica valores observados, linha vermelha indica valores relativos ao CS1_CV e linha amarela ao CS1_SV. Período entre as 00:00 UTC do dia 08/06/2017 e 00:00 UTC do dia 10/06/2017.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.2 - Índices estatísticos obtidos na comparação entre as estimativas das simulações CS1_SV e CS1_CV e os dados observados para o período entre as 00:00 UTC do dia 08/06/2017 e 00:00 UTC do dia 10/06/2017. Variável MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

CS\Subárea	Subárea 1			Subárea 2			Subárea 3			Subárea 6		
	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC	EM	REQM	CC
CS1_SV	0,3	17,60	0,09	-17,2	26,95	0,33	0,90	18,81	0,05	-3,77	24,71	0,20
CS1_CV	0,5	13,50	0,13	-6,0	13,31	0,72	2,22	10,89	0,45	-3,29	14,52	0,46

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi estudar os impactos dos aerossóis atmosféricos e da mudança no uso do solo no desenvolvimento de tempestades severas em regiões urbanas. A região de estudo selecionada foi a Região Metropolitana de São Paulo, localizada no Sudeste do Brasil. Para o estudo se utilizou o sistema de modelagem ambiental CCATT-BRAMS-JULES como ferramenta principal para a realização de simulações numéricas que foram a base do estudo dos impactos. Foram analisados dois casos de estudo de tempestades severas para os quais foram registrados valores significativos de precipitação sobre a RMSP. O primeiro deles, entre os dias 5 e 6 de junho de 2017, relacionado com o avanço de um sistema frontal, e o segundo, ocorrido entre os dias 24 e 25 de fevereiro de 2017, teve a convecção local associada com a entrada da brisa marítima como principal mecanismo por trás da intensa precipitação observada.

Inicialmente foram realizados o diagnóstico, a avaliação e a validação da nova versão do CCATT-BRAMS-JULES, a 5.4, que teve como principal modificação a inserção de um novo núcleo dinâmico, o que melhorou o desempenho computacional. Simulações diagnósticas da nova versão demonstraram o seu correto funcionamento, tanto do ponto de vista computacional como no que diz respeito à representação das características ambientais. Nesse processo de diagnóstico inicial foram utilizadas configurações padrões que não incluíam a incorporação da microfísica de nuvens de 2 momentos de (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014). Uma vez verificado o desempenho na configuração padrão, passou-se a um segundo momento que consistiu em avaliar e calibrar o modelo no que diz aos parâmetros relacionados com a microfísica de nuvens de 2 momentos, isso considerando as características específicas da região de estudo no que diz respeito às propriedades dos aerossóis.

Foram definidos 8 conjuntos de simulações (CSs) diferentes que permitiram calibrar os parâmetros da microfísica relacionados com o raio médio e a higroscopicidade das partículas de aerossóis. O foco desse processo de calibragem foi a melhora na representação da precipitação. Três domínios geográficos com resoluções espaciais diferentes foram implementados seguindo um sistema de aninhamento numa direção e semiautomática. Posteriormente, outros 5 conjuntos de simulações foram definidos e ajudaram na atualização das concentrações dos aerossóis que o módulo de microfísica utiliza para fazer os cálculos relacionados com a distribuição das gotas de nuvens.

Os resultados mostraram que existia uma subestimação das concentrações nos dados dos aerossóis utilizados inicialmente pelo modelo, o que prejudicava a representação dos eventos de precipitação. Visando mitigar essa limitação, fez-se um estudo das concentrações do Materia Particulado (MP10T) em superfície, a partir dos dados da CETESB, que serviu como base na calibragem enquanto foi mantido o padrão de variação na altura já definido.

Uma vez avaliado e calibrado a nova versão do sistema CCATT-BRAMS-JULES, se procedeu à obtenção dos conjuntos de simulações que serviram como referência para o comprimento dos próximos objetivos deste estudo. Foram obtidos dois novos CSs, um para cada caso de estudo, denominados CONTROLE.

A terceira parte da presente pesquisa foi focada nas análises dos resultados dessas simulações referências com o objetivo de identificar as deficiências do modelo na representação dos eventos extremos de precipitação, e o seu desempenho como preditor das condições meteorológicas em geral. Ao serem comparados os dados das simulações com os dados das medições se observou que a estimativa do momento final do evento de precipitação foi antecipada nas simulações. Tal situação provocou diferenças que foram significativas em alguns horários e para algumas variáveis como os casos da radiação solar e da temperatura. No entanto, de forma geral, a estimativa feita pelo modelo foi satisfatória. Vale destacar que as maiores diferenças entre observado e simulado aconteceram em horários fora do período em que ocorreram os eventos de precipitação extrema. Na comparação entre os resultados para os três domínios de resoluções espaciais diferentes percebeu-se que ao melhorar a resolução o ganho no desempenho não é generalizado. Algumas variáveis respondem melhor enquanto outras são estimadas com maiores erros. A velocidade do vento em superfície foi a que mais melhorou com o aumento da resolução espacial, a razão para isso tem a ver com o aprimoramento das características do relevo, principalmente dentro da região urbana, que passam a ser melhor representadas.

Outro objetivo específico do trabalho, que foi executado em um quarto momento, consistiu na comparação do desempenho do modelo em estimar a precipitação frente a diferentes produtos de precipitação derivados de medidas radiométricas realizadas a bordo de satélites. Nesse sentido, se obteve que o MERGE ((ROZANTE et al., 2010)) foi o melhor entre os 7 resultados analisados, incluindo o da previsão do modelo numérico. Indicando que o processo de atualização deste produto realizado no ano de 2020, contribuiu com uma melhora da sua precisão e acurácia na estimativa da variável precipitação. Os produtos GSMaP calibrado e GPM_3IMERGHH apresentaram desempenhos semelhantes ao CCATT-BRAMS-JULES. Os piores resultados, muito diferente do observado, foram obtidos com os produtos GSMaP não calibrado e o CMORPH, que apresentaram superestimacões acentuadas dos acumulados de chuva na região para ambos casos de estudo.

Posteriormente, num quinto momento, se procedeu a comparar os resultados obtidos em outros 6 CSs que foram inicializados em momentos diferentes em relação aos CONTROLES. Também foram considerados outros 2 conjuntos, um para cada caso de estudo, que foram inicializados no mesmo horário que a referência, mas com condições iniciais provenientes de fonte diferente. No caso dos CONTROLES foram utilizados dados do ERA5 enquanto nesses 2 novos conjuntos foram empregados dados do modelo GFS. Nesta fase, os resultados para cada caso de estudo tiveram diferenças importantes. Para o caso de estudo 01, o desempenho do modelo foi significativamente melhor para o CONTROLE, este foi sempre na que a previsão foi mais acertada. A utilização dos dados do GFS para inicializar a simulações provocou uma subestimação significativa da precipitação e valores altos nos índices estatísticos que quantificam a acurácia do modelo. Em todos os casos analisados os valores de REQM foram mais que o dobro do obtido para a simulação de referência. Já para o caso de estudo 02, as diferenças entre os CS foram menores e com desempenhos parecidos na previsão das principais variáveis meteorológicas, isso tanto nas simulações que utilizaram GFS como nas que foi utilizado o ERA5. Analisando os valores dos índices estatísticos, pode se dizer que para o caso de estudo 02, depois do CONTROLE, as simulações inicializadas com GFS foram as que tiveram o segundo melhor resultado.

A complexa relação entre as concentrações dos aerossóis na microfísica, a disponibilidade de umidade e o próprio desenvolvimento das nuvens ficou evidente na última parte deste trabalho com a análise dos resultados derivados da comparação entre as simulações testes. Não foi possível identificar um padrão específico em relação aos efeitos dos aerossóis, as influências variam dependendo da natureza do sistema meteorológico associado ao evento extremo. Variações nas concentrações dos aerossóis não provocaram mudanças nas localizações dos núcleos convectivos nem nas áreas de máximos e mínimos acumulados de precipitação. As diferenças foram principalmente no tamanho e intensidade desses sistemas de nuvens. As mudanças na superfície, com a substituição da mancha urbana pela vegetação, sim trazem como consequência variações nas localizações das células que formam as tempestades, mudando a forma e momentos em que elas passam pelos seus estágios de desenvolvimento. Para os casos testados e analisados, considerando o subdomínio que abrange a RMSP como um todo, a eliminação da mancha urbana provocou uma superestimação da precipitação em relação aos CONTROLES.

Para o caso de estudo 01, onde o sistema associado ao evento de precipitação é de grande escala, o impacto da superfície não foi tão significativo nas mudanças da precipitação como no caso de estudo 02, que foi principalmente associado a sistemas convectivos de escala local e a sua interação com o avanço da frente da Brisa Marítima. Nesse último caso, a natureza da superfície se mostrou fundamental nas variações encontradas, tanto que o efeito da diminuição dos aerossóis é quase imperceptível quando se compararam os testes de sensibilidade que não consideram a mancha urbana e tiveram diferenças nas concentrações dos aerossóis. A ilha de calor urbana, observada na simulação CONTROLE, modificou o padrão de circulação dos ventos e com a chegada de ar mais frio, associada com a entrada da frente de brisa do mar, aumentou o fluxo de calor sensível, o que favoreceu movimentos convectivos que serviram para atrasar o avanço da brisa e modificar os padrões de precipitação que ocorreriam na sequência sobre a RMSP. Os efeitos combinado da superfície e da frente da brisa foram os mecanismos de disparo da convecção profunda no momento em que a segunda começou a avançar pela região sul da RMSP. A maior disponibilidade de umidade na simulação sem mancha urbana também contribuiu com um aumento da área de precipitação mais intensa. Ao mesmo tempo, e dado que o evento significativo para o caso 02 foi provocado por um conjunto de células diferentes de tempestades que surgiram em cadeia, as mudanças na localização destas células provocou mudanças também nas áreas de convergência em superfície associadas às correntes descendentes, o que teve como consequência variações nos estágios das subseqüentes células, como foi apresentado anteriormente.

Para o caso de estudo 01, o efeito da mudança na superfície não anulou o da diminuição dos aerossóis, o segundo fator provocou uma diminuição das áreas de superestimação da precipitação em relação à referência.

Também foi possível observar que o impacto individual das variações em cada tipo de aerossol não é significativo quando se analisa a região como um todo. Os efeitos mais relevantes são principalmente nas áreas onde ocorreram os maiores acumulados de precipitação. Por exemplo, no caso de estudo 01, uma forte subestimação foi observada onde os acumulados ficaram acima de 100 mm para o período, na simulação CONTROLE. Para o caso de estudo 02, se observou que a diminuição das concentrações dos dois tipos de aerossóis tratados nesta pesquisa, os higroscópicos e os não higroscópicos, provocou uma subestimação/superestimação maior nas regiões de máxima/mínima precipitação. Para o caso 01, diminuir a concentração dos aerossóis não higroscópicos provocou maior superestimação de precipitação, enquanto aumentar a concentração favoreceu picos mais intensos de subestimação. Nesse mesmo caso de estudo, diminuir os aerossóis higroscópicos aumentou a subestimação, o aumento deles deu como resultado uma área maior onde foi significativa a superestimação.

Em relação à intensidade da precipitação, ela sempre foi maior quando o teste de sensibilidade considerou a vegetação no lugar da mancha urbana, isso relacionado talvez com a maior disponibilidade de umidade, principalmente no caso de estudo 02. Os acumulados totais no subdomínio de estudo, que abrange a RMSP, foram semelhantes para todas as simulações pertencentes ao mesmo caso de estudo. Para identificar diferenças relevantes teria que ser considerada uma área menor onde as áreas de subestimação não se contrapõem às áreas de superestimação da precipitação.

Ao analisar os hidrometeoros, foi possível verificar que mudanças na concentração e propriedades dos aerossóis provocaram variações no perfil vertical das concentrações dos mesmos. Em ambos casos, a diminuição dos dois tipos de aerossóis, ou de cada um de forma individual, favoreceu um aumento das áreas de máxima concentração de hidrometeoros totais na alta troposfera.

Em suma, o presente trabalho evidenciou a complexa relação que existe entre as propriedades e as concentrações dos aerossóis, a presença da superfície urbana e os eventos de precipitação. Estudos específicos para cada região urbana são fundamentais para entender o comportamento dos sistemas e a forma como impacta cada fator durante eventos extremos de precipitação de diferentes naturezas. Melhorar as informações da representação espacial e das propriedades das populações dos aerossóis utilizados pelo modelo com certeza constituiria um avanço nos processos de entendimento e de previsão dos impactos dos mesmos nas regiões urbanas. Foi com esse objetivo que a tarefa final deste trabalho focou em uma implementação visando melhorar a representação das emissões dos poluentes atmosférico, em particular os aerossóis, considerando a detalhada malha viária que caracteriza a RMSP. Os resultados mostraram uma estratificação mais realista das emissões, principalmente sobre as áreas dentro da mancha urbana, e contribuíram para a melhora nas previsões das concentrações de MP em relação com os dados obtidos nas estações de superfície. Futuros trabalhos que permitam a retroalimentação entre os resultados de emissão de aerossóis do próprio modelo, considerando a química da atmosfera e os processos de microfísica, e a microfísica das nuvens serão fundamentais para o avanço no entendimento dos impactos aqui estudados e do sistema CCATT-BRAMS-JULES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, J.; VILA, D.; GAN, M.; QUISPE, D.; BARRETO, N.; CHINCHAY, J. H.; PALHARINI, R. Precipitation diurnal cycle assessment of satellite-based estimates over Brazil. **Remote Sensing**, n. 12, p. 2339, 2020. 73
- AGOSTO, M. A.; SOUZA, C. D. R.; SILVA, D. S.; SILVA, M. A. V.; JUNIOR, I. C. L.; RODRIGUES, J. M. M.; ALMEIDA, M. L. R.; BARBOZA, A. P. **Inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2011. Relatório Final. 23
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Primer inventario nacional e emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasília, 2011. Disponível em: <http://antigo.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=540>. Acesso em: 01 fev. 2021. 8, 22, 23
- AKBARI, H.; BELL, R.; BRAZEL, T.; COLE, D.; ESTES, M.; HEISLER G. HITCHCOCK, D.; JOHNSON, B.; LEWIS M. MCPHERSON, G.; OKE, T.; PARKER D. PERRIN, A.; ROSENTHAL, J.; SAILOR D. ANF SAMENOW, J.; TAHA, H.; VOOGT, J.; WINNER, D.; WOLF, K.; ZALPH, B. **Reducing urban heat islands: compendium of strategies**. 2008. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 1, 32, 33, 35, 37
- ALBRECHT, B. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. **Science**, v. 145, p. 1227–1230, 1989. 18
- ALBUQUERQUE, T. T. de A.; ANDRADE, M. de F.; YNOUE, R. Y. Characterization of atmospheric aerosols in the city of São Paulo, Brazil: comparisons between polluted and unpolluted periods. **Environmental Monitoring and Assessment**, n. 184, p. 969–984, 2012. 103
- ALMEIDA, G. P.; BITTENCOURTA, A. T.; EVANGELISTAA, M. S.; VIEIRA-FILHOB, M. S.; FORNAROC, A. Characterization of aerosol chemical composition from urban pollution in Brazil and its possible impacts on the aerosol hygroscopicity and size distribution. **Atmospheric Environment**, n. 202, p. 149–159, 2012. 103
- ALONSO, M. F. **Previsão do tempo químico para a América do Sul: impacto relativo das emissões urbanas nas escalas local e regional**. 218 p.

Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2011/06.06.15.12.09/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 43, 45, 86, 97, 107, 255, 264

ANDRADE, M.; KUMAR, P.; FREITAS, E.; YNOUE, R.; MARTINS, J.; MARTINS, L.; NOGUEIRA, T.; PEREZ-MARTINEZ, P.; MIRANDA, R.; ALBUQUERQUE, T. Air quality in the megacity of São Paulo: evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 159, p. 66–82, 2017. 25, 26

ARYA, P. S. **Air pollution, meteorology and dispersion**. USA: New York: Oxford University Press, 1999. 32 p. 8

ASSUNÇÃO, J. V. Poluição atmosférica. In: CASTELLANO, E. G. I. (Ed.). **Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias**. São Paulo: Academia de Ciência do Estado de São Paulo, 1998. p. 271–308. 13

BACKMAN, J.; HAKALA, J.; NIEMINEN, T.; MANNINEN, H. E.; AALTO, P.; SIIVOL, a. E.; PETAJA, T.; KULMALA, M.; RIZZO, L.; MORAI S F. AND ARTAXO, P. C. S. H. R. The variability of urban aerosol size distributions and optical properties in São Paulo - Brazil: new particle formation events occur at the site. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 11, n. 11, p. 30419–30455, 2011. 103

BENDER, A.; FREITAS, E. D.; MACHADO, L. A. T. The impact of future urban scenarios on a severe weather case in the metropolitan area of São Paulo. **Climatic Change**, v. 156, p. 471–488, 2019. 42

BRASSEUR, G. P. **Atmospheric chemistry and global change**. [S.l.]: Oxford: Oxford University Press, 1999. 654 p. 21

BURDEN, R.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. México: Iberoamérica, 1996. 807 p. 2a ed. 50

CAMILLONI, I.; BARRUCAND, M. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 1222 – 1239, 2011. 36

CARDOSO, R. S. **Classificação de potenciais unidades climáticas em Presidente Prudente-SP**. 135 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/138512>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 36

CARVALHO, V. S. D. **O impacto das megacidades na qualidade do ar em escala local e regional: os casos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro**. 237 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010. 11

CHIN, M.; ROOD, R. B.; LIN, S.; MULLER, J.; THOMPSON, A. M. Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model gocart: model description and global properties. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 24671–24687, 2000. 95

CHOVERT, A. D. **Estudo dos inventários de emissões urbanas para a previsão da qualidade do ar durante os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos Rio 2016**. Cachoeira Paulista: [s.n.], 2016. 23p. Relatório técnico. 116, 120, 126, 258

CHOVERT, A. D.; ALONSO, M. F. Estimated evolution of total pollutant gas emissions associated with vehicle activity in the metropolitan region of Porto Alegre until 2030. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 3, p. 1971–1983, 2017. 23

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relatório anual de qualidade do ar -1992**. São Paulo, 1992. 134p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/qualidade-ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/1992.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2017. 57

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2015**. São Paulo, 2016. 167p. Relatório técnico. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/RQAR-2015.pdf>>. 27

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2016**. São Paulo, 2017. 202p. Relatório técnico. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2013/12/relatorio-ar-2016.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 24, 27

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2017**. São Paulo, 2018. 201p. Relatório técnico. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2019/05/RelatC3B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2017.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 24, 27

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2018**. São Paulo, 2019. 214p. Relatório técnico. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2019/07/RelatC3B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2018.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 24, 27

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2019**. São Paulo, 2020. 228p. Relatório técnico. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/07/RelatC3B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2019.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 3, 12, 23, 24, 27, 118

COTTON, W. R.; PIELKE, R. A.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.; CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P. Rams 2001: current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, n. 1, p. 5–29, 2003. 94

DAGAN, G.; KOREN, I.; ALTARATZ, O. Competition between core and periphery-based processes in warm convective clouds - from invigoration to suppression. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 5, p. 2749–2760, 2015. 2, 18, 20

DAMILANO, D. C. R. **Estudo da influência da poluição atmosférica e das condições meteorológicas na saúde em São José dos Campos**. São José Dos Campos, 2006. 44p. Relatório final de projeto de iniciação científica. Disponível em: <[SICINPE](#)>. Acesso em: 01 fev. 2021. 8, 11, 12, 13

DERWENT, R. G.; JENKIN, M. E.; SAUNDERS, S. M.; PILLING, M. J.; SIMMONDS, P. G.; PASSANT, N. R.; DOLLARD, G. J.; DUMITREAN, P.; KENT, A. Photochemical ozone formation in north west europe and its control. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 1983–2006, 2003. 9

DIAS, M. S.; DIAS, J.; CARVALHO, L.; FREITAS, E. D.; DIAS, P. S. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, n. 3-4, p. 705–722, 2013. 41, 108

DIXON, P. G.; MOTE, T. L. Patterns and causes of atlanta’s urban heat island–initiated precipitation. **American Meteorological Society**, v. 42, p. 1273–1284, 2003. 2, 38

- EIDHAMMER, T.; DEMOTT, P. J.; KREIDENWEIS, S. M. A comparison of heterogeneous icenucleation parameterizations using a parcel model framework. **Journal of Geophysical Research - Atmospheres**, v. 114, 2009. 95
- ELIASSON, I.; SVENSSON, M. K. Spatial air temperature variations and urban landuse – a statistical approach. **Meteorological Applications**, v. 10, p. 135–149, 2003. 32
- EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A - EMPLASA. **Rede Metropolitana de São Paulo**. Brasil, 2021. Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 57, 59, 61
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Compilation of air pollutant emission factors**. 1999. Disponível em: <<http://www.epa.gov/>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 22
- ERIKSEN, W. Okologische crapekteder umwelt belastung hannovers stadtklina und lutverunreinigung. **Hannover und sein Unland**, 1978. 35
- ESPINOSA, S. A. I. **Modelagem da poluição atmosférica em São Paulo utilizando inventários de emissões veiculares *bottom-up***. 158 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/t_sergio_a_i_espinosa_corrigenida.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2021. 24
- FAN, J.; ZHANG; Y.; LI, Z.; HU, J.; ROSENFELD, D. Urbanization-induced land and aerosol impacts on sea breeze circulation and convective precipitation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 20, p. 14163–14182, 2020. 30
- FAZENDA, A. L.; PANETTA, J.; KATSURAYAMA, D. M.; RODRIGUES, L. F.; MOTTA, L. G.; NAVAUX, P. Challenges and solutions to improve the scalability of an operational regional meteorological forecasting model. **International Journal of High Performance Systems Architecture.**, v. 3, p. 87, 2011. 91
- FAZENDA, A. L.; RODRIGUES, E. R.; TOMITA, S. S.; PANETTA, J.; MENDES, C. L. Improving the scalability of an operational scientific application on a large multi-core cluster. In: **SYMPOSIUM ON COMPUTING SCIENCE**. [S.l.: s.n.], 2012. 91
- FEINGOLD, G.; HEYMSFIELD, A. J. Parameterizations of condensational growth of droplets for use in general circulation models. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 49, p. 2325–2342, 1992. 95

FERREIRA, M. R. S. **Método dos elementos finitos aplicado às equações de águas rasas**. 150 p. Dissertação (Mestre em Matemática Aplicada) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/86092>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 48

FERREIRA, R. C.; ALVES, M. P.; PAULO, V. M.; ARAVÉQUIA, E. P.; ANTÔNIO, N. J. J.; RITTER, L.; BISCARO, T. S. Impacto das parametrizações de microfísica na previsão de precipitação utilizando assimilação de dados de radar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 123–134, 2020. 52

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. 156 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) — Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Edmilson_Freitas/publication/35460233_Circulacoes_locais_em_Sao_Paulo_e_sua_influencia_sobre_a_dispersao_de_poluentes/links/00b7d527ab951c5f2c000000/Circulacoes-locais-em-Sao-Paulo-e-sua-influencia-sobre-a-dispersao-de-poluentes.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2021. 11, 40

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C.; COTTON, W. R.; DIAS, P. L. S. Interactions of urban heat island and sea breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo – Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43–65, 2007. 3, 4, 38, 41, 44

FREITAS, S. **Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases traços e de aerossóis de queimadas no cerrado e floresta tropical**. Tese (Doutorado em Ciências) — Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-15082012-164538/publico/39796Freitas.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 86

FREITAS, S. R.; PANETTA, J.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F.; MOREIRA, D. S.; ROSÁRIO, N. E.; DIAS, P. L. S.; DIAS, M. A. F. S.; SOUZA, E. P.; FREITAS, E. D.; LONGO, M.; FRASSONI, A.; FAZENDA, A. L.; SILVA, C. M. S.; PAVANI, C. A. B.; EIRAS, D.; FRANÇA, D. A.; MASSARU, D.; SILVA, F. B.; CAVALCANTE, F.; PEREIRA, G.; CAMPONOGARA, G.; FERRADA, G. A.; VELHO, H. F. C.; MENEZES, I.; FREIRE, J. L.; ALONSO, M. F.; GÁCITA, M. S.; ZARZUR, M.; FONSECA, R. M.; LIMA, R. S.;

SIQUEIRA, R. A.; BRAZ, R.; TOMITA, S.; OLIVEIRA, V.; MARTINS, L. D. The brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (brams 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. **Geoscientific Model Development Discussions**, n. 1, p. 1–55, 2017. [43](#), [44](#), [51](#), [55](#), [85](#), [89](#), [91](#), [93](#), [97](#), [101](#), [116](#), [253](#)

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER - FEPAM. **Primeiro inventário de emissões atmosféricas das fontes móveis do Rio Grande do Sul**. 2010. Disponível em:

<[http://www.detran.rs.gov.br/conteudo/33918/1%EF%BF%](http://www.detran.rs.gov.br/conteudo/33918/1%EF%BF%BD-inventario-de-emissoes-atmosfericas-das-fontes-moveis-do-estado-do-rio-grande)

[BD-inventario-de-emissoes-atmosfericas-das-fontes-moveis-do-estado-do-rio-grande](http://www.detran.rs.gov.br/conteudo/33918/1%EF%BF%BD-inventario-de-emissoes-atmosfericas-das-fontes-moveis-do-estado-do-rio-grande)>.

Acesso em: 01 fev. 2021. [23](#)

GACITA, M. S. **Estudos numéricos de química atmosférica para a região do Caribe e América Central com ênfase em Cuba**. 450 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.14.20.32/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. [43](#), [97](#), [256](#)

GEBREMICHAEL, M.; HOSSAIN, F.; HUFFMAN GEORGE J. AND ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. **Satellite rainfall applications for surface hydrology**. Alemanha: Springer, 2010. 327 p. The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). [73](#)

GONCALVES, W.; MACHADO, L.; KIRSTETTER, P. Influence of biomass aerosol on precipitation over the central amazon: an observational study. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 12, p. 6789–6800, 2015. [20](#)

GONÇALVES, N. D. **Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Matemática) — Universidade do Porto, Porto, 2007. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/302956015.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. [48](#)

GOUVEA, M. L. **Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo**. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/m_mariana_l_gouvea.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2021. [36](#), [37](#)

GOUVêA, M. L.; SAAD, S. I.; FREITAS, E. D.; DIAS, P. L. S.; CAMARGO, R. Estudo de caso: tempestade envolvendo interação entre a brisa marítima e o efeito de ilha de calor urbana em 01/03/99. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006. **Anais ...** Florianópolis, 2006. 2, 40

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 10, p. 5233–5250, 2014. 52, 86, 101

GRELL, G. A.; PECKMANN, S.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S. A.; FROST, G.; SKAMAROCK, W. C.; EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the wrf model. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 6957–6975, 2005. 43

HASSAN, V. V.; FRANÇA, J. R. de A.; MENEZES, W. F. Análise de parâmetros microfísicos na modelagem numérica de uma tempestade severa no estado do Rio Grande do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências.**, v. 43, n. 2, p. 384–394, 2020. 52

HENKES, A. F. **Estudos de partículas de aerossóis e gases traços na atmosfera da bacia Amazônica: influencias das circulações regionais e de larga escala.** Tese (Doutorado) — Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 1999. 86

HENKES, A. F. **Estudo de sensibilidade da parametrização urbana do modelo BRAMS na simulação da ilha de calor na região metropolitana de São Paulo.** 116 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.17.15.45/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 36, 91, 101

HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D.; GU, G.; BOWMAN, K.; STOCKER WOLFF, D. The trmm multi satellite precipitation analysis (tmpa): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, n. 8, p. 38–55, 2007. 72

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D.; BRAITHWAITE, D.; HSU, K.; JOYCE, R.; KIDD, C.; NELKIN, E.; XIE, P. **NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm theoretical basis Doc.** United State of America, 2015. Relatório técnico. Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V4.5.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2021. 72

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D.; NELKIN, E. **Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation**. NASA Doc. United State of America, 2015. Relatório técnico. Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_doc.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2021. 72

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Brasil, 2021. Cidades de São Paulo. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 3, 57, 60, 61

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2005. Second Edition. 49, 50

JOYCE, R.; JANOWIAK, J.; ARKIN, P.; XIE, P. Cmorph: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, p. 487–7503, 2004. 73

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution**, v. 151, n. 2, p. 362–367, 2008. 7

KAUFMAN, Y. J.; KOREN, I.; REMER L. A. AND ROSENFELD, D.; RUDICH, Y. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, p. 11207–11212, 2005. 20

KHAIN, A. P.; BEHENG, K. D.; HEYMSFIELD, A.; KOROLEV, A.; KRICHAK, S. O.; LEVIN, Z.; PINSKY, M.; PHILLIPS, V.; PRABHAKARAN, T.; TELLER, A.; HEEVER, S. C. Van den; YANO, J. I. Representation of microphysical processes in cloudresolving models: spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization. **Reviews of Geophysics**, v. 53, p. 247–322, 2015. 18, 53, 54

KOREN, I.; ALTARATZ, O.; REMER, L. A.; FEINGOLD, G.; MARTINS, J. V.; HEIBLUM, R. H. Aerosol-induced intensification of rain from the tropics to the mid-latitudes. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 2, p. 118–122, 2012. 2, 20

KREIDENWEIS, S. M. **Aerosol hygroscopicity: particles water content and its role in atmospheric processes**. [S.l.]: Oxford: Elsevier, 2014. 331-361 p. 17

KUBOTA, T.; SHIGE, S.; HASHIZUME, H.; AONASHI, K.; TAKAHASHI, N.; SETO, S.; HIROSE, M.; TAKAYABU, Y.; USHIO, T.; NAKAGAWA, K.;

IWANAMI, K.; KACHI, M.; OKAMOTO, K. Project: production and validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.**, n. 45, p. 2259–2275, 2007. 73

LAL, D.; PAWAR, S. Effect of urbanization on lightning over four metropolitan cities of India. **Atmospheric Environment**, n. 7, p. 191–196, 2011. 2, 38

LAWRENCE, M. G.; BUTLER, T. M.; STEINKAMP, J.; GURJAR, B.; LELIEVELD, J. Regional pollution potentials of megacities and other major population centers. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 7, p. 3969–3987, 1999. 8

LEE, S. S.; KIM, B.; LI, Z.; CHOI, Y.-S.; JUNG, C.; UM, J.; MOK, J.; ; SEO, K. Aerosol as a potential factor to control the increasing torrential rain events in urban areas over the last decades. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 18, p. 12531–12550, 2018. 2, 28, 226

LEI, M.; NIYOGIL, D.; KISHTAWAL, C.; PIELKE, R. A.; BELTR´AN-PRZEKURAT, A.; NOBIS, T. E.; VAIDYA, S. S. Effect of explicit urban land surface representation on the simulation of the 26 july 2005 heavy rain event over mumbai, india. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 5975–5995, 2008. 2, 38

LIU, Z.; MING, Y.; ZHAO, C.; LAU, N. C.; GUO, J.; BOLLASINA, M.; YIM, S. H. L. Contribution of local and remote anthropogenic aerosols to a record-breaking torrential rainfall event in guangdong province, china. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 20, p. 223–241, 2020. 2, 29

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; PIRRE, M.; MARECAL, V.; RODRIGUES, L. F.; PANETTA, J.; ALONSO, M. F.; ROSARIO, N. E.; MOREIRA, D. S.; GÁCITA, M. S.; ARTETA, J.; FONSECA, R.; STOCKLER, R.; KATSURAYAMA, D. M.; FAZENDA, A.; BELA, M. The chemistry catt–brams model (ccatt–brams 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. **Geoscience Model Developing**, v. 6, p. 1389–1405, 2013. 43, 46, 85, 86, 88, 97, 101

MARTINILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M. W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 104, p. 261–304, 2002. 37

MARTINS, E. M.; MACHADO, M. C. S.; CORRÊA, S. M.; ARBILLA, G.; MOREIRA, A.; MOREIRA, L. F. Impacto dos fatores meteorológicos na qualidade

do ar da região metropolitana de Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. **Anais ...** Rio de Janeiro, 2000. 12

MATUS, A. V.; L'ECUYER, T. S. The role of cloud phase in earth's radiation budget. **JGR Atmosphere**, v. 122, n. 5, 2002. 52

MCFIGGANS, G.; ARTAXO, P.; FALTENSPERGER, U.; COE, H.; FACCHINI, M. C.; FEINGOLD, G.; FUZZI, S.; GYSEL, M.; LAAKSONE, A.; LOHMANN, U.; MENTEL, T. F.; MURPHY, D. M.; ODOWS, C. D.; SNIDER, J. R.; WEINGARTNER, E. The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 9, p. 2593–2649, 2006. 2, 18

MEGA, T.; USHIO, T.; KUBOTA, T.; AONASHI, K.; SHIGE, S. Gauge adjusted global satellite mapping of precipitation (*gsmap_{gauge}*). **URSI GASS**, v. 12, p. 1 – –4, 2014. 73

MELLOR G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, p. 851–875, 1982. 86

MONTAVEZ, J. P.; RODRÍGUEZ, A.; JIMÉNEZ, J. I. A study of the urban heat island of granada. **International Journal of Climatology**, v. 20, p. 899–911, 2000. 32

MONTEIRO, d. S. D.; RIZZO, L. V.; CARBONE S. AND SCHLAG, P. A. P. Physical and chemical properties of urban aerosols in São Paulo, Brazil: links between composition and size distribution of submicron particles. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-2020-533>, 2021. 103

MOREIRA, D. S.; FREITAS, S. R.; BONATTI, J. P. Coupling between the jules land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS 1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America. **Geoscientific Model Development**, n. 6, p. 1243–1259, 2013. 85, 87, 89, 90

MORRIS, C. J. G.; SIMMONDS, I.; PLUMMER, N. E. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. **Journal of Applied Meteorology**, n. 40, p. 169–182, 2001. 22

NOBRE, C. A. **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo - relatório Final**. São José dos Campos, 2011. 192p. Relatório técnico. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/264383509_Vulnerabilidades_das_megacidades_basileiras_as_mudancas_climaticas_Regiao_Metropolitana_de_Sao_Paulo_-_Relatorio_Final>. Acesso em: 01 fev. 2021. 60

NOCEDA, M. D. **Estimación, análisis y evaluación de inventarios de emisiones atmosféricas antropogénicas a escala local, regional y continental**. 242 p. Tese (Doutorado em Química) — Universidade Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 2013. 23

OH, H.-R.; HO, C.-H.; KOO, Y.-S.; BAEK, K.-G.; YUN, H.-Y.; HUR, S.-K.; CHOI, D.-R.; JHUN, J.-G.; SHIM, J.-S. Impact of chinese air pollutants on a record-breaking pms episode in the republic of korea for 11-15 january 2019. **Atmospheric Environment**, v. 223, 2020. 109

OKE, T. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.**, n. 108, p. 1–24, 1982. 36

OLIVIER, J.; BERDOWSKI, J. Radiation, temperature e humidity over forest and pasture in amazonia. In: BERDOWSKI J.; GUICHERIT, R.; HEIJ, B. E. (Ed.). **The climate system**. [S.l.]: The Netherlands, 2001. p. 33–78. 98

ORGANIZAÇÃO DE NAÇÕES UNIDAS - ONU. **A new urban paradigm: pathways to sustainable development**. Quito, 2016. 48p. Relatório ,. Disponível em: <http://www.ipc-undp.org/pub/eng/PIF37_A_new_urban_paradigm_pathways_to_sustainable_development.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2017. 1

PACHECO, M. T.; PARMIGIANI, M. M. M.; ANDRADE, M. F.; MORAWSKA, L.; KUMAR, P. A review of emissions and concentrations of particulate matter in the three major metropolitan areas of Brazil. **Journal of Transport and Health**, n. 4, p. 23–72, 2017. 25

PACYNA, J. M. Sources, particle size distribution and transport of aerosols. In: KOUIMTZIS T.; SAMARA, C. E. (Ed.). **Airborne particulate matter**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. p. 715. 15

- PARRISH, D. D.; SINGH H, B.; MOLINA, L.; MADRONICH, S. Air quality progress in north american megacities: a review. **Atmospheric Environment.**, v. 45, p. 015–7025, 2011. 37
- PEREIRA, A. J. Chuvas de verão e as enchentes na grande São Paulo: El Niño, brisa marítima e ilha de calor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. **Anais ...** Rio de Janeiro, 2000. 40
- PIELKE, R. A.; COTTON, W.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; J., L. T.; COPELAND, J. H. A. A comprehensive meteorological modeling system –rams. **Meteorology and Atmospheric Physics**, n. 49, p. 69–91, 1992. 85
- PREIN, A. F.; LANGHANS, W.; FOSSER, G.; FERRONE, A.; BAN, N.; GOERGEN, K.; KELLER, M.; TÖLLE, M.; GUTJAHR, O.; FESER, F.; BRISSON, E.; KOLLET, S.; SCHMIDLI, J.; LIPZIG, N. P. M. van; LEUNG, R. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 2, p. 323–361, 2015. 51
- RAVEN, P. H.; BERG, L. R.; JOHNSON, G. B. **Environment**. [S.l.]: Fort Worth, Saunders College Publishing, 1995. 528 p. 13
- REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. d. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012. 61
- REZENDE, V. **O método de Galerkin**. 49 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005. Disponível em: <http://www.sites.uem.br/pma/discente/defesas-dissertacoes/veridiana_rezende.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2021. 48
- RODRIGUES, P. F. **Avaliação da higroscopicidade de aerossóis urbanos pela técnica LIDAR RAMAR**. 107 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2014. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Patricia%20Ferrini%20Rodrigues_D.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2021. 20
- RODRIGUEZ, C. A. M.; ROCHA, R. P.; BOMBARDI, R. On the development of summer thunderstorms in the city of São Paulo: mean meteorological

characteristics and pollution effect. **Atmospheric Research**, v. 96, p. 477– 488, 2010. [30](#), [224](#)

ROJAS, C. S. A. **Condições meteorológicas e níveis de poluição na região metropolitana de Lima – Perú**. 148 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2013. [11](#)

RONDA, R.; HEUSINKVELD, B.; STEENEVELD, G.; ATTEMA, J. J.; HOLTSLAG, B. Urban fine-scale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2017. [3](#)

ROSALES-CASTILLO, J. A.; TORRES-MEZA, V. M.; OLAIZ-FERNÁNDEZ, G.; BORJA-ABURTO, V. H. Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. **Salud Pública de México**, v. 43, n. 6, p. 544–555, 2000. [8](#)

ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; YAMASOE, M. A.; M., F. R. Modeling the south american regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 6, p. 2923–2938, 2013. [86](#)

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES., L. G. G.; VILA, D. A. Combining trmm and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885–894, 2010. [72](#), [73](#), [275](#)

RYAN, W. F.; PIETY, C. A.; LUEBEHUSEN, E. D. Air quality forecasts in the mid-atlantic region: current practice and benchmark skill. **Weather and Forecasting**, v. 15, p. 46–60, 1999. [12](#)

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, p. 3085–3102, 2011. [35](#)

SAXENA, P.; SRIVASTAVA, A. **Air pollution and environmental health**. Singapore: Springer, 2020. [7](#)

SEINFELD, J. **Atmospheric chemistry and physics of air pollution**. USA: New York: John Willey Sons, 1986. 1232 p. [7](#), [8](#), [12](#)

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. [S.l.]: A Wiley-Interscience Publication, 1998. 1326 p. 9, 15, 16, 19

SESTINI, M. F.; ALVALÁ, R. C. S.; MELLO, E. M. K. e. a. **Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos**. São José dos Campos: INPE, 2002. 85

SILLMAN, S. Tropospheric ozone and photochemical smog. In: LOLLAR, B. S. e. (Ed.). **Environmental geochemistry: treatise on geochemistry**. USA: [s.n.], 2005. p. 407–431. 8

SILVA, F. B. **Análise dos efeitos combinados da ilha de calor urbana e poluição do ar**. 269 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.02.17.48/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021. 36, 39, 41, 42, 91, 101

SILVA, F. B.; LONGO, K. M.; ANDRADE, F. M. Spatial and temporal variability patterns of the urban heat island in São Paulo. **Environments**, v. 2, n. 27, p. 26, 2017. 59

SILVA, H. S. **Estudo da circulação associada a uma ilha de calor urbana com um modelo de simulação da brisa marítima**. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1986. 1, 4, 40, 243

SILVA, K. L. A. **Inventário de emissões veiculares para a cidade de Pelotas/RS**. 45 p. Monografia (Conclusão de curso em Meteorologia) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014. Disponível em: <http://www2.ufpel.edu.br/prg/sisbi/bibct/acervo/meteoro/2014/karen_silva_2014.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2021. 23

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M. **Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. United Kingdom, 2007. Relatório técnico. Acesso em: 20 fev. 2021. 19

SORIANO, L. R.; PABLO, F. D. Effect of small urban areas in central Spain on the enhancement of cloud-to-ground lightning activity. **Atmospheric Environment**, v. 36, p. 2809–2816, 2002. 38

- SOUSA, C. A.; LIRA, J.; FERREIRA, M. A.; CARACIOLO, R. L. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 350–354, 2012. 41
- TAN, J.; HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. Imerg v06: changes to the morphing algorithm. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 36, n. 12, p. 2471–2482, 2019. 73
- THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T. A study of aerosol impacts on cloud and precipitation development in large winter cyclone. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, p. 3636–5115, 2014. 4, 56, 94, 96, 103, 105, 108, 116, 273
- THOMPSON, G.; FIELD, P. R.; RASMUSSEN, R. M.; HALL, W. D. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part ii: implementation of a new snow parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 5095–5115, 2008. 2, 4, 56, 94
- TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R. The colorado state university three-dimensional cloud mesoscale model - parti: general theoretical framework and sensitivity experiments. **Journal de Recherches Atmospheriques**, v. 16, p. 185–220, 1982. 85
- TWOMEY, S. The influence of pollution on the shorteave albedo of clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 34, n. 7, p. 1149–1152, 1977. 17, 18
- UNO, I.; CARMICHAEL, G. R.; STREETS, D. G.; TANG, Y.; YIENGER, J. J.; SATAKE, S.; WANG, Z.; WOO, J.-H.; GUTTIKUNDA, S.; UEMATSU, M.; MATSUMOTO, K.; TANIMOTO, H.; YOSHIOKA, K.; IIDA, T. Regional chemical weather forecasting system cfors: Model descriptions and analysis of surface observations at japanese island stations during the ace-asia experiment. **Journal of Geophysical Research**, n. 108, p. 36–53, 2003. 43
- VASCONCELLOS, P. C. **Um estudo sobre a caracterização de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e seus derivados, e hidrocarbonetos alifáticos saturados em material particulado atmosférico proveniente de sítios urbanos, suburbanos e florestais**. 103 p. Tese (Doutorado em Química), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 13
- VENDRASCO, E. P.; FREITAS, E. D.; DIAS, P. L. S. Separação de fatores para estudo dos efeitos do albedo e emissividade sobre o ciclo diurno de temperatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004. **Anais ...** Fortaleza, 2004. 35

WALKO, R.; BAND L.AND BARON, J.; KITTEL F.AND LAMMERS, R.; LEE T.AND OJIMA, D. P. R. T. C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 6, p. 931–944, 2000. 85

WANG, Y.; LI, Z.; ZHANG, Y.; DU, W.; ZHANG, F.; TAN, H.; XU, H.; FAN, T.; JIN, X.; FAN, X.; DONG, Z.; WANG, Q.; SUN, Y. Characterization of aerosol hygroscopicity, mixing state, and ccn activity at a suburban site in the central north china plain. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 16, p. 11739–11752, 2018. 103

WICKER, L. J. Ta two-step adams-bashforth-moulton split-explicit integrator for compressible atmospheric models. **Monthly Weather Review**, v. 137, p. 3588–3595, 2009. 51

WICKER, L. J.; SKAMAROCK, W. C. Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes. **Monthly Weather Review**, v. 130, p. 2088–2097, 2002. 50

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. USA: Academic Press, 1995. 964 p. 113, 114

WILLEKE, K.; BARON, P. A. **Aerosol measurement: principles techniques and applications**. USA: New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 904 p. 14, 16

YASSI, A.; KJELLSTROM, T.; KOK, T. D.; GUIDOTTI, I. **Salud ambiental básica**. México: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, 2002. 551 p. 7

YNOUE, R. Y.; ANDRADE, M. de F. Characteristics of urban aerosols size-resolved mass balance of aerosol articles over the São Paulo metropolitan area of Brazil. **Aerosol Science and Technology**, v. 11, n. 38 (S2), p. 52–62, 2004. 103

YOUNG, A. F. Urban expansion and environmental risk in the São Paulo metropolitan area. **Climate Research**, v. 57, n. 1, p. 73–80, 2013. 60

YUAN, T.; REMER, L. A.; YU, H. Microphysical, macrophysical and radiative signatures of volcanic aerosols in trade wind cumulus observed by the a-train. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, p. 7119–7132, 2011. 20

ZALDIVAR, L. C. **Influencia de los tipos de situaciones sinópticas en la deposición total de metales pesados**. 132 p. Monografía (Conclusão de curso em Meteorologia) — Facultad de Medio Ambiente (InSTEC), Havana, 2013. 7

ZHANG, L.; FU, T.; TIAN H., M. Y.; CHEN, J.; TSAI, T. Anthropogenic aerosols significantly reduce mesoscale convective system occurrences and precipitation over southern China. **Geophysical Research Letters**, n. 47, 2020. 2, 29

ZHAO, C. S.; TIE, X. X.; LIN, Y. P. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China. **Geophysical Research Letters**, n. 33, p. 11814–11835, 2006. 28

ZHONG, S.; QIAN, Y.; ZHAO, C.; LEUNG, R.; WANG, H.; YANG, B.; FAN, J.; YAN, H.; YANG, X.; LIU, D. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the yangtze river delta region of China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 17, p. 5439–5457, 2017. 31, 241

ZHOU, S.; YANG, J.; ZHAO, C.; WANG, W.-C.; GONG, D.; SHI, P. Diurnal variation of heavy rainfall over the beijing-tianjin-hebei region: Role of 2 aerosol cloud effect and its sensitivity to moisture. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 19, p. 12650–12672, 2018. 2, 29

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.