

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.17.15.45-TDI

# ESTUDO DE SENSIBILIDADE DA PARAMETRIZAÇÃO URBANA DO MODELO BRAMS NA SIMULAÇÃO DA ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Alice Franciéli Henkes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Nelson Jesuz Ferreira, e Ariane Frassoni dos Santos de Mattos, aprovada em 05 de maio de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NNB7K2>

> INPE São José dos Campos 2017

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Gabinete do Diretor (GB) Serviço de Informação e Documentação (SID) Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970 São José dos Campos - SP - Brasil Tel.:(012) 3208-6923/6921 E-mail: pubtc@inpe.br

# COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

## Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

## Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) **BIBLIOTECA DIGITAL:** 

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID) EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.17.15.45-TDI

# ESTUDO DE SENSIBILIDADE DA PARAMETRIZAÇÃO URBANA DO MODELO BRAMS NA SIMULAÇÃO DA ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Alice Franciéli Henkes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Nelson Jesuz Ferreira, e Ariane Frassoni dos Santos de Mattos, aprovada em 05 de maio de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NNB7K2>

> INPE São José dos Campos 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Henkes, Alice Franciéli.

H389e Estudo de sensibilidade da parametrização urbana do modelo BRAMS na simulação da ilha de calor na região metropolitana de São Paulo / Alice Franciéli Henkes. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxii + 91 p.; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.17.15.45-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Nelson Jesuz Ferreira, e Ariane Frassoni dos Santos de Mattos.

Ilha de calor urbana.
RMSP. 3. BRAMS.
Parametrização urbana. I.Título.

CDU 551.588.7(1-21)(815.6)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

- Aluno (a): Alice Franciéli Henkes
  - Título: "ESTUDO DE SENSIBILIDADE DA PARAMETRIZAÇÃO URBANA DO MODELO BRAMS NA SIMULAÇÃO DA ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Meteorologia

Orlentador(a) | INPE

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho

Presidente UNPE Cachoeira Paulista - SP

Cachoeira Paulista - SP

- Dr. Nelson Jesuz Ferreira
- Dra. Ariane Frassoni dos Santos de Mattos

Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Fernanda Batista da Silva

randa Zilla

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Edmilson Dias de Freitas

Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

- () maioria simples
- () unanimidade

"Se sua coragem sumir, vá além de sua coragem." .

Emily Dickinson e Cheryl Strayed

## AGRADECIMENTOS

Em especial ao meu orientador Dr. Nelson Jesuz Ferreira. Um verdadeiro "self made man"do tipo que lidera pelo exemplo, um admirável senhor do seu próprio destino, e um grande amigo pra mim, que sempre tentei aprender com sua sabedoria, na vida e na ciência, e com suas experiências culturais e internacionais. A minha orientadora Dra. Ariane Frassoni, por ter abraçado a proposta, meus agradecimentos por todo o auxílio e ajuda.

À Fernanda Batista, uma pessoa de especial notoriedade tanto profissional quanto pessoal. Também pela grande amiga e incentivadora que tem sido.

Aos membros da banca: Dr. Edmilson Dias de Freitas, Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho e a Dra. Fernanda Batista.

Aos amigos e colegas do CPTEC/INPE. Em especial à turma de Mestrado e Doutorado do ano de 2015 por toda a camaradagem.

Agradeço aos amigos: Domingo, Layrson, Thamiris, Rayonil, Julliana, Lina e Luiz Bacelar pelo grande apoio e incentivo durante essa fase.

Ao Valter Oliveira pela ajuda e suporte com BRAMS e companheirismo nesses meses de dissertação.

À minha família, que sempre me apoiou integralmente e confiou na minha capacidade e esforço. Também à Laíse e Julia, minhas irmãs de coração. E ao Bruno pelo constante apoio e por me permitir viver e compartilhar este momento importante da minha vida com ele.

Ao CNPq pela bolsa de estudos.

#### RESUMO

Um dos principais efeitos decorrentes da urbanização é o surgimento de climas e microclimas locais, que caracterizam-se por mudanças no balanço de energia, altas temperaturas do ar próximo à superfície, baixa umidade relativa e poluição do ar. As áreas urbanas são geralmente mais quentes se comparadas aos seus arredores (áreas rurais ou suburbanas), ocasionando a formação de uma Ilha de Calor Urbana (ICU). O presente estudo propôs avaliar as propriedades da superfície na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) por meio de testes de sensibilidade nas parametrizações urbanas do modelo de superfície Joint UK Land Environment Simulator (JULES), componente do Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS), visando a descrição dos fatores associados à intensidade da ICU nesta área. O BRAMS conta com duas opções de parametrização urbana: a primeira é o esquema denominado 1T, que conta com uma única camada (ou superfície), enquanto a segunda de duas superfícies, compreende dois esquemas: 2T e Met Office – Reading Urban Surface Exchange Scheme (MORUSES). Os testes de sensibilidade foram realizados a partir da modificação de propriedades dos materiais por meio da variação do albedo, da emissividade, da capacidade térmica da superfície cânion e telhado no esquema urbano 2T, e modificações na razão geométrica do cânion e no calor antrópico no esquema urbano MORUSES. Foram realizadas simulações da temperatura do ar do modelo BRAMS utilizando os esquemas 2T e MORUSES durante o período de 23 de setembro a 30 de setembro de 2011 visando analisar o impacto dos testes de sensibilidade nesta variável e também na Intensidade da Ilha de Calor Urbana (IICU) sobre a RMSP. As simulações com ambos os esquemas indicaram que o ciclo diurno de temperatura e a IICU é fisicamente bem representado. Os testes de sensibilidade indicaram que a temperatura do ar sofre maior influência com as mudanças do parâmetro capacidade térmica, seguido do albedo e por fim da emissividade. Por meio dos testes de sensibilidade utilizando o esquema MORUSES, foi observado que o efeito vertical da geometria urbana (associada à altura dos prédios) contribui para um maior aquecimento noturno, devido ao armazenamento de calor pelo dossel urbano, quando leva-se em consideração uma razão geométrica alta em comparação com a razão geométrica baixa, caracterizada pela perda radiativa mais rápida à noite. Observou-se que a dependência da geometria contida no esquema MORUSES evidencia uma característica importante quanto à evolução diurna das componentes do balanço de energia na superfície (BES). Os esquemas também permite a ativação do parâmetro calor antrópico, que controla a quantidade de calor adicionado ao ambiente devido a atividades realizadas pelo homem, como por exemplo, contribuição do aquecimento ambiental devido ao uso de ar condicionado. Nos testes de sensibilidade observa-se que o calor antrópico ativado está associado ao aumento da temperatura do ar. O maior detalhamento do BES aliado ao maior realismo do esquema MORUSES com a geometria local em relação ao esquema 2T contribui para uma melhor representação do ciclo diurno da temperatura 2 metros e consequentemente da IICU sobre a RMSP.

Palavras-chave: Ilha de Calor Urbana. RMSP. BRAMS. Parametrização Urbana.

## SENSITIVITY STUDY OF URBAN SURFACE SCHEMES IN THE MODEL BRAMS TO SIMULATE THE HEAT ISLAND OVER THE METROPOLITAN AREA OF SÃO PAULO

#### ABSTRACT

One of the main effects due to urbanization is the emergence of locals climates and microclimates, that are characterized by changes in the energy balance, high air temperatures near surface, low relative air humidity and air pollution. Urban areas are generally hotter, if compared with their proximity (rural or suburban areas), causing the formation of an urban heat island (UHI). The purpose of this study was to evaluate the surface properties at Metropolitan Region of São Paulo (MASP), through sensitivity tests in the urban parameterizations of surface model Joint UK Land Environment Simulator, component of Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS), aiming to describe the factors associated to the UHI intensity in this area. BRAMS has two urban parameterizations options: a first called 1T, which has only one layer (or surface), while the second, comprise two schemes: 2T and Met Office – Reading Urban Surface Exchange Scheme (MORUSES), of two surfaces. Sensitivity tests were performed from the modification of properties of materials by means of albedo variation, emissivity, thermal capacity of canion surface and of roof in the urban scheme 2T, and modifications in the canion's with aspect ratio (ratio of building height to road width) in the urban scheme MORUSES. Air temperature simulations were performed using the schemes 2T and MORUSES during the period from September 23 to September 30 of 2011, aiming to analyze the impact of sensitivity tests in this variable, beyond the UHI intensity over the MASP. The simulations with both schemes indicated that, physically, the diurnal cycle of the temperature of UHI is well represented. The sensitivity tests indicated that air temperature suffers a greater influence with changes in thermal capacity, followed by albedo and emissivity. Through of sensitivity tests using MORUSES scheme, it was verified that the vertical effect of urban geometry (associated with height of buildings) contributes for a greater nocturnal heating, due to heat storage by urban canopy, considering a high geometric reason, in comparison with a low geometric reason, characterized by radiative loss faster at night. It was noticed that the dependency of the geometry contained in MORUSES scheme evidences an important characteristic to the diurnal evolution of the urban energy balance components. The schemes allows too the activation of anthropic heat parameter, which control the amount of heat added to the ambient due to operations produced by man, for example, contribution of environmental heating due to operation of air conditioning. In the sensitivity tests, it is verified that activated anthropic heat is associated to air temperature increase. The greater detailing of urban energy balance combined with greater realism of MORUSES scheme with the local geometry in relation to the 2T scheme contributes to a better representation of diurnal cycle of the temperature at 2 meters and consequently, of the UHI over the MASP.

Keywords: Urban Heat Island. MASP. BRAMS. urban surface scheme.

# LISTA DE FIGURAS

| 2.1 | Representação esquemática da abordagem média volumétrica para o ba-     |    |
|-----|---|----|
|     | lanço de energia urbana.  | 8  |
| 2.2 | Variação da temperatura para diversos pontos nas regiões rurais, subur- |    |
|     | bana e urbana.  | 9  |
| 2.3 | Mapa da topografia tridimensional da RMSP, com Serra da Mantiqueira     |    |
|     | e Serra do Mar  | 12 |
| 2.4 | Diferença de temperatura no primeiro nível vertical do modelo conside-  |    |
|     | rando e desprezando o efeito da cidade                                  | 13 |
| 3.1 | domínios utilizados nas simulações realizadas.                          | 19 |
| 3.2 | Diagrama ilustrativo da estrutura do modelo de superfície JULES         | 22 |
| 3.3 | Geometria bidimensional simplificada do dossel urbano para o esquema    |    |
|     | de duas camadas   | 23 |
| 3.4 | Geometria bidimensional do modelo de resistência utilizado no esquema   |    |
|     | MORUSES   | 25 |
| 3.5 | Mapa de uso do solo com a localização das estações meteorológicas uti-  |    |
|     | lizadas na análise estatística  | 32 |
| 4.1 | Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros ob-   |    |
|     | servada e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando |    |
|     | os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de São Caetano          | 36 |
| 4.2 | Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros ob-   |    |
|     | servada e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando |    |
|     | os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de Parelheiros          | 36 |
| 4.3 | Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros ob-   |    |
|     | servada e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando |    |
|     | os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de Pinheiros. $\ .\ .$  | 37 |
| 4.4 | Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros ob-   |    |
|     | servada e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando |    |
|     | os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de Taboão da Serra.     | 37 |
| 4.5 | Simulação da IICU durante dois casos de estudo.                         | 39 |
| 4.6 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar    |    |
|     | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a  |    |
|     | alteração na capacidade térmica do telhado e cânion                     | 43 |

| 4.7  | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o   |    |
|------|--|----|
|      | teste) considerando a mudança na capacidade térmica na simulação da      |    |
|      | temperatura do ar a 2 metros   | 44 |
| 4.8  | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar     |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a   |    |
|      | alteração na emissividade do telhado e cânion                            | 45 |
| 4.9  | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o   |    |
|      | teste) considerando a mudança na emissividade na simulação da tempe-     |    |
|      | ratura do ar a 2 metros  | 46 |
| 4.10 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar     |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a   |    |
|      | alteração no albedo do telhado e cânion.                                 | 47 |
| 4.11 | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o   |    |
|      | teste) considerando a mudança do albedo na simulação da temperatura      |    |
|      | do ar a 2 metros.  | 48 |
| 4.12 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar     |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a   |    |
|      | alteração na capacidade térmica e emissividade no telhado e cânion       | 49 |
| 4.13 | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o   |    |
|      | teste) considerando a mudança da capacidade térmica e emissividade na    |    |
|      | simulação da temperatura do ar a 2 metros                                | 50 |
| 4.14 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar     |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a   |    |
|      | alteração na capacidade térmica e albedo no telhado e cânion. $\ldots$ . | 51 |
| 4.15 | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o   |    |
|      | teste) considerando a mudança da capacidade térmica e albedo na simu-    |    |
|      | lação da temperatura do ar a 2 metros                                    | 52 |
| 4.16 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar     |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a   |    |
|      | alteração na emissividade e albedo no telhado e cânion                   | 53 |
| 4.17 | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o   |    |
|      | teste) considerando a mudança da emissividade e albedo na simulação      |    |
|      | da temperatura do ar a 2 metros  | 53 |
| 4.18 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar     |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando     |    |
|      | a alteração na capacidade térmica, emissividade e albedo no telhado e    |    |
|      | cânion   | 55 |

| 4.19 | Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o          |    |
|------|---|----|
|      | teste) considerando a mudança da capacidade térmica, emissividade e             |    |
|      | albedo na simulação da temperatura do ar a 2 metros. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ | 56 |
| 4.20 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a $2$      |    |
|      | metros dos experimentos Controle-MOR e o experimento de sensibilidade           |    |
|      | "análise", em que a razão geométrica foi alterada para 0,1. $\ldots$            | 58 |
| 4.21 | Contribuição (diferença entre o Controle e o teste) e interação entre fa-       |    |
|      | tores na temperatura do ar a 2 metros   | 59 |
| 4.22 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar            |    |
|      | a 2 metros dos experimentos Controle-MOR e o experimento de sensibi-            |    |
|      | lidade "Construções", em que a razão geométrica foi alterada para 3 e o         |    |
|      | experimento com opção de calor antrópico ativado.                               | 61 |
| 4.23 | Contribuição (diferença entre o Controle e o teste) e interação entre fa-       |    |
|      | tores na temperatura do ar a 2 metros   | 62 |
| 4.24 | Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a          |    |
|      | 2 metros dos experimentos Controle-MOR e o experimento de sensibili-            |    |
|      | dade "Edifícios Altos", em que a razão geométrica foi alterada para 5 e o       |    |
|      | experimento com opção de calor antrópico ativado.                               | 63 |
| 4.25 | Contribuição (diferença entre o Controle e o teste) e interação entre fa-       |    |
|      | tores na temperatura do ar a 2 metros   | 64 |
| 4.26 | Variação diurna do Delta do experimento de sensibilidade, onde a capa-          |    |
|      | cidade térmica foi aumentada por um fator de 10 em relação ao controle.         | 66 |
| 4.27 | Variação diurna do $\Delta$ do experimento de sensibilidade, onde a emissivi-   |    |
|      | dade foi alterada para 1  | 67 |
| 4.28 | Variação diurna do $\Delta$ do experimento de sensibilidade, onde o albedo foi  |    |
|      | modificado por um valor moderado para a área urbana                             | 68 |
| 4.29 | Variação diurna do $\Delta$ para $\frac{H}{W} = 0.1.$                           | 69 |
| 4.30 | Variação diurna do $\Delta$ para $\frac{H}{W} = 3$ .                            | 69 |
| 4.31 | Variação diurna do $\Delta$ para $\frac{H}{W} = 5$                              | 70 |
| 4.32 | Ciclo diurno das variáveis do fluxo de energia médio no período de 26 a         |    |
|      | $30~{\rm de}$ setembro de 2011 para a simulação controle utilizando o esquema   |    |
|      | urbano 2T, com a opção de calor antrópico ativada e desativada                  | 71 |
| 4.33 | Ciclo diurno das variáveis do fluxo de energia médio no período de 26 a         |    |
|      | $30~{\rm de}$ setembro de 2011 para a simulação controle utilizando o esquema   |    |
|      | urbano MORUSES, com a opção de calor antrópico ativada e desativada.            | 72 |
| 4.34 | Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros $\hfill$      |    |
|      | observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas               |    |
|      | urbanos 2T e MORUSES para a estação de São Caetano                              | 73 |

| 4.35 | Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros |    |
|------|---|----|
|      | observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas |    |
|      | urbanos 2T e MORUSES para a estação de Parelheiros                | 74 |
| 4.36 | Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros |    |
|      | observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas |    |
|      | urbanos 2T e MORUSES para a estação de Pinheiros                  | 74 |
| 4.37 | Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros |    |
|      | observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas |    |
|      | urbanos 2T e MORUSES para a estação de Taboão da Serra            | 75 |

4.38 Comparação entre a simulação e a observação da lha de Calor a) Durante o período de análise 26 de setembro de 2011 a 30 de setembro de 2011 b) Ciclo diurno médio da IICU c) 26 a 27 de setembro d) 29 a 30 de setembro. 77

## LISTA DE TABELAS

# Pág.

| 3.1 | Configuração das simulações utilizadas no experimento de referência               |    |
|-----|---|----|
|     | $(EXP-controle)  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $ | 20 |
| 3.2 | Diferenças na configuração do EXP-Controle e da simulação com a versão            |    |
|     | versão operacional do CPTEC   | 21 |
| 3.3 | Parâmetros da superfície urbana utilizados no esquema 2T para o expe-             |    |
|     | rimento controle e testes de sensibilidade  | 26 |
| 3.4 | Parâmetros da superfície urbana utilizados no esquema MORUSES para                |    |
|     | o experimento controle e testes de sensibilidade                                  | 26 |
| 3.5 | Caracterização dos experimentos de sensibilidade utilizando o esquema             |    |
|     | 2T a partir da análise de separação de fator                                      | 28 |
| 3.6 | Contribuições dos fatores principais, suas interações e método de cálculo         |    |
|     | no esquema urbano 2T  | 29 |
| 3.7 | Caracterização dos experimentos de sensibilidade utilizando o esquema             |    |
|     | MORUSES a partir da análise de separação de fator                                 | 30 |
| 3.8 | Contribuições dos principais fatores do esquema urbano MORUSES, suas              |    |
|     | interações e método de cálculo.   | 30 |
| 4.1 | Valores da capacidade térmica do material para diferentes estudos. As             |    |
|     | colunas contém os valores referente a cada tipo de superfície coletados           |    |
|     | das fontes. Adaptado de Roulet (2004)   | 41 |
| 4.2 | Testes estatísticos aplicados na simulação em cada estação meteorológica          | 75 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| 1T            | _ | 1 Tile   |
|---------------|---|--|
| $2\mathrm{T}$ | _ | 2 Tiles  |
| ARW           | _ | Advanced Research  |
| BES           | _ | Balanço de Energia na Superfície                                   |
| BRAMS         | _ | Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System |
| CC            | _ | Condição de Contorno   |
| CI            | _ | Condição Inicial   |
| CCATT         | _ | Coupled Aerosol and Tracer Transport                               |
| CETESB        | _ | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo                         |
| CLD           | _ | Camada Limite do Dossel Urbano                                     |
| CLP           | _ | Camada Limite Planetária   |
| CLU           | _ | Camada Limite Urbana   |
| CPTEC         | _ | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos                   |
| CSU           | _ | Colorado State University  |
| ECMWF         | _ | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts                 |
| EROS          | _ | Earth Resources Observation Systems                                |
| FINEP         | _ | Financiadora de Estudos e Projetos                                 |
| HL            | _ | Hora Local   |
| IBGE          | _ | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                    |
| ICU           | - | Ilha de Calor Urbana   |
| IICU          | - | Intensidade da Ilha de Calor Urbana                                |
| INPE          | - | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                          |
| JULES         | _ | Joint UK Land Environment Simulator                                |
| LES           | — | Large Eddy Simulations   |
| MDU           | - | Modelo de Dossel Urbano  |
| MODIS         | _ | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer                      |
| MORUSES       | — | Met Office – Reading Urban Surface Exchange Scheme                 |
| MOSES         | - | Met Office Surface Exchange Scheme                                 |
| NC            | — | Nível de Confiança   |
| NDVI          | — | Normalized Difference Vegetative Index                             |
| NPFT's        | — | Tipos Não Funcionais de Plantas                                    |
| OGE           | _ | Olson Global Ecosystem   |
| PFT's         | — | Tipos Funcionais de Plantas  |
| PNT           | — | Previsão Numérica de Tempo   |
| R             | — | Coeficiente de Correlação  |
| RADAMBRASIL   | _ | Radar na Amazônia Brasil   |
| RAMS          | — | Regional Atmospheric Modeling System                               |
| REDEMET       | — | Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica                     |
| RMRJ          | _ | Região Metropolitana do Rio de Janeiro                             |
| RMSE          | — | Raiz do Erro Quadrático Médio                                      |

- RMSP t-TEB Região Metropolitana de São Paulo
- tropical TEB
- TEB Town Energy Budget \_
- United States Geological Survey's USGS \_
- WRF \_ Weather Research and Forecasting

# SUMÁRIO

# Pág.

| 1 INTRODUÇÃO  | <b>1</b> |
|---|----------|
| 1.1 Motivação   | 4        |
| 1.2 Objetivos   | 4        |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA                   | 7        |
| 2.1 Clima Urbano  | 7        |
| 2.1.1 Balanço de Energia na Superfície (BES)                      | 7        |
| 2.1.2 Ilha de Calor Urbana  | 9        |
| 2.1.3 Parametrizações urbanas                                     | 9        |
| 2.2 RMSP  | 11       |
| 2.2.1 Resultados de estudos anteriores para a região de interesse | 12       |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS 1  | 17       |
| 3.1 Modelo Atmosférico BRAMS                                      | 17       |
| 3.1.1 Configuração utilizada                                      | 18       |
| 3.2 Modelo de superfície JULES                                    | 21       |
| 3.3 Estudos de sensibilidade                                      | 25       |
| 3.4 Métodos de Separação de Fatores                               | 27       |
| 3.4.1 Experimentos – $2T$   | 27       |
| 3.4.2 Experimentos – MORUSES                                      | 28       |
| 3.5 Estudo de Caso  | 30       |
| 3.6 Análise dos fatores na ICU                                    | 31       |
| 3.7 Balanço de Energia na Superfície (BES) Urbana                 | 31       |
| 3.8 Análise Estatística   | 32       |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES   | 35       |
| 4.1 Análise do Experimento Controle                               | 35       |
| 4.2 Testes de Sensibilidade                                       | 40       |
| 4.2.1 Esquema 2T  | 40       |
| 4.2.2 Esquema Urbano MORUSES                                      | 56       |
| 4.2.3 Síntese dos testes de sensibilidade                         | 64       |
| 4.3 Influência dos fatores na ICU                                 | 65       |
| 4.4 BES Urbana  | 70       |

| 4.5 | Análise do Experimento Operacional | 72 |
|-----|------------------------------------|----|
| 5   | CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES  | 79 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros   | 81 |
| RF  | EFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS          | 83 |

### 1 INTRODUÇÃO

A maioria da população atualmente reside em áreas urbanas e acredita-se que em 2050, 66% da população mundial viverá nessas regiões. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), estima-se que 2,5 bilhões de pessoas a mais viverão nas mesmas áreas urbanas que já existem hoje. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) destaca-se como a sétima maior aglomeração urbana do mundo e a maior da América do Sul, ultrapassando regiões como Buenos Aires, na Argentina, Lima, no Peru e Bogotá, na Colômbia. A RMSP possui uma área com extensão de aproximadamente 8.000 km<sup>2</sup>, onde 2.000km<sup>2</sup> são efetivamente urbanizadas, e uma população estimada de 19.700.000 habitantes (IBGE/2010), aproximadamente metade da população do Estado de São Paulo.

O crescimento demográfico acelerado das grandes cidades sul-americanas, em conjunto com a falta de planejamento urbano e infraestrutura, trazem graves problemas ambientais (ALONSO, 2011). Um dos principais efeitos decorrentes da urbanização é o surgimento de climas e microclimas locais, que caracterizam-se por mudanças no balanço de energia, altas temperaturas do ar próximo à superfície, baixa umidade e poluição do ar (ARNFIELD, 2003). As diferenças entre o clima de uma cidade em relação ao clima dos arredores (áreas rurais ou suburbanas) é denominada como "clima urbano" (KUTTLER, 2008). As áreas urbanas são geralmente mais quentes, e tal condição é denominada como Ilha de Calor Urbana<sup>1</sup> (ICU) (BEST; GRIMMOND, 2014). A ICU afeta negativamente não só os moradores residentes das áreas urbanas, mas também os seres humanos e seus ecossistemas localizados em regiões mais distantes das cidades, uma vez que, por meio da alteração do microclima local, acarreta em diferenças marcantes entre as regiões.

O aquecimento urbano diferenciado e mais elevado que as vizinhanças ocasiona diferentes efeitos (BEST; GRIMMOND, 2014), dentre os quais destaca-se o desenvolvimento de tempestades severas (BORNSTEIN; LIN, 2000), alterações na dispersão de poluentes devido às mudanças na estrutura da Camada Limite Planetária (CLP) (SARRAT et al., 2006; LUHAR et al., 2014), os impactos sobre a produção e mistura de ozônio (CHAXEL; CHOLLET, 2009; RYU et al., 2013), o uso de resfriamento por meio da utilização de aparelhos de ar condicionado (RADHI; SHARPLES, 2013; LI et al., 2014), que provoca a liberação de mais calor no ambiente, entre outros. Assim, as diferenças entre o clima de áreas rurais e urbanas se devem principalmente às ca-

 $<sup>^{1}</sup>$ A referência ao termo "ilha" deve-se à similaridade com as regiões em que a configuração das isotermas se assemelha à curva de nível de uma ilha do mar.

racterísticas termo-físicas e geométricas urbanas, fontes de calor e umidade presente na área (TAHA, 1997).

O estudo da ICU baseia-se em uma descrição mais detalhada do Balanço de Energia na Superfície (BES) das áreas urbanas. A diferença nas trocas de energia surgem a partir de diversos processos, dentre eles se destaca a configuração e a geometria da área urbana. A geometria de um cânion contribui para aumentar a radiação solar incidente e a radiação de onda longa que é absorvida, devido a reflexões múltiplas e irradiação a partir das estruturas tridimensionais (BEST; GRIMMOND, 2014). A orientação dos cânions e a elevação do sol terão impacto sobre a radiação solar refletida, modificando a penetração da luz do sol no cânion. A redução da disponibilidade de água na superfície urbana em comparação com superfícies de solo vegetado ou naturalmente nus contribui para a intensificação da liberação de calor sensível ao invés de fluxo de calor latente (BEST; GRIMMOND, 2014). No entanto, uma proporção maior desta energia é utilizada para aquecer os edifícios, devido a inércia térmica dos materiais, o que resulta em mudanças no ciclo diurno de temperaturas nas áreas urbanas (BEST; GRIMMOND, 2014).

A diferença da temperatura urbana-rural quando existe, é geralmente maior na área urbana, especialmente durante condições de céu claro e ventos calmos (FREITAS; DIAS, 2005). Nessas condições, em diversas áreas urbanas, esse aquecimento pode promover uma circulação local conhecida como brisa urbana, influenciando diretamente a distribuição espacial da concentração dos poluentes (FREITAS et al., 2007; RYU et al., 2013; SILVA, 2016). O aumento de gases e particulados próximo à superfície auxilia na formação e dá suporte à formação da ICU, uma vez que ocorrem modificações no balanço de energia e no aprisionamento de calor junto à superfície.

A formação e a intensificação da ICU, assim como a mitigação desse fenômeno, depende de muitos fatores, tais como as condições meteorológicas, a liberação de calor antrópico, as propriedades e as características das superfícies urbanas, como por exemplo, albedo, capacidade térmica e ausência de vegetação (??).

Além de muitos estudos observacionais e teóricos, o avanço no entendimento da ICU e suas interações beneficiou-se de modelos de dossel urbano<sup>2</sup> (ou também chamados de esquemas urbanos). Esses esquemas urbanos consideram o efeito dos edifícios, assim como as paredes e o telhado, estradas e rodovias, bem como materiais que ocasionam alterações no cálculo do BES. O avanço na simulação da ICU ocorreu a

 $<sup>^2 \</sup>mathrm{Entende}$ se por dossel urbano como o nível da altura média das edificações.

partir do acoplamento de esquemas urbanos aos modelos atmosféricos (BEST, 2005). A partir da análise do clima das cidades considerando as características tridimensionais, obteve-se uma melhor resposta física dos processos de superfície, destacando o BES nas áreas urbanas (MARCIOTTO, 2008; MORAIS, 2014; SILVA, 2016). Apesar da ICU ser frequentemente considerada como o exemplo mais bem documentado de mudança climática antrópica (ARNFIELD, 2003), a compreensão permanecem incompletas devido às interações entre diversos efeitos forçantes e à complexidade inerente da modelagem numérica.

Para futura concepção de edifícios e planejamento das cidades é importante considerar os processos dominantes que levam a efeitos de aquecimento urbano (BEST; GRIMMOND, 2014). Isso requer o desenvolvimento de modelos capazes de representar as características mais importantes da ICU para uso em modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (BEST; GRIMMOND, 2014).

Nas previsões e estudos numéricos em escala urbana (alta resolução) é requerido de forma explícita o tratamento da complexidade da geometria da cobertura urbana e das propriedades dos materiais. Dadas as condições de contorno de superfície, esperase que os modelos numéricos simulem os fluxos de calor, umidade e momento, de modo que os esquemas de parametrização urbana e o modelo atmosférico estejam bem acoplados e representem os processos de retroalimentação entre a atmosfera e a superfície. Um modelo de interação superfície-atmosfera amplamente utilizado pela comunidade científica é o Joint UK Land Environment Simulator (JULES). No Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) ele está acoplado ao modelo atmosférico operacional BRAMS. A versão 5.2 deste modelo conta com duas opções de parametrização urbana no JULES. A primeira é o esquema denominado 1T (BEST, 2005), que conta com uma única camada (ou superfície), enquanto a segunda parametrização, compreende dois esquemas: 2T(BEST et al., 2006) e MORUSES (PORSON et al., 2010), de duas superfícies (SILVA, 2016). Como consequência, uma das principais motivações desse trabalho é a compreensão do desempenho dos dois esquemas urbanos de duas superfícies 2T e MORUSES, implementado no BRAMS.

Esta dissertação abordará, em particular, a variedade de efeitos gerados pela morfologia complexa de uma área urbana. A simulação da intensidade da ICU será realizada a partir de testes de sensibilidade, buscando uma melhor descrição da resposta física dos processos de superfície. Apesar da importância do papel da vegetação nas regiões urbanas (MORAIS, 2014) e da poluição do ar (SILVA, 2016), seus efeitos combinados sobre a ICU não serão considerados no presente trabalho.

#### 1.1 Motivação

No Brasil, o CPTEC/INPE trabalha com o estado da arte em previsões numéricas de tempo, clima e modelagem ambiental, buscando produzir produtos de alta qualidade para serem disponibilizados para seus usuários. Com isso, há a necessidade de uma contínua melhoria nos modelos numéricos e novas funcionalidades específicas vêm sendo implementadas nas versões atuais. A resolução horizontal dos modelos de PNT e qualidade do ar em operação no CPTEC/INPE não é suficiente para resolver os processos físicos e dinâmicos associados à complexidade de áreas urbanas (BEST, 2005). O BRAMS é um dos modelos regionais que se encontra em operação no CPTEC/INPE e desde o início da previsão operacional em 2003, evoluiu de modo a contar hoje com esquemas de parametrização de superfícies urbanas (SILVA, 2016). Dada a demanda por produtos operacionais para os grandes centros urbanos, seja em termos meteorológicos ou de qualidade do ar, é fundamental dar continuidade a trabalhos realizados com o objetivo de aperfeiçoar os modelos do CPTEC/INPE. Isto possibilitará simular os processos físicos e dinâmicos sobre as áreas densamente urbanizadas, como é o caso da RMSP. Em vista do exposto, este trabalho contribuirá para o desenvolvimento de produtos de PNT voltados para a RMSP, como também pode ser usado para o aperfeiçoamento dos efeitos de possíveis cenários sobre áreas densamente urbanizadas, servindo de suporte para o planejamento urbano.

#### 1.2 Objetivos

Este trabalho propõe avaliar diferentes propriedades da superfície urbana que exercem influência na simulação da temperatura do ar a 2 metros e consequentemente na Intensidade da ICU (IICU). Tais propriedades são analisadas pela realização de testes de sensibilidade nas parametrizações urbanas disponíveis no modelo BRAMS visando a descrição dos processos físicos associados à IICU sobre a RMSP.

Com este objetivo principal, pretende-se especificamente:

 Quantificar a influência dos parâmetros de superfície e suas interações nas parametrizações urbanas de duas camadas do modelo regional BRAMS, por meio de modificações das propriedades dos materiais como a variação no albedo, emissividade e capacidade térmica da superfície, cânion e telhado no esquema 2T. Também, modificar a representação da estrutura urbana por meio da razão geométrica no esquema MORUSES.

- Avaliar qualitativamente o efeito das características das construções urbanas no ciclo diurno da temperatura do ar a 2 metros e na representação do BES;
- Analisar a importância relativa de cada superfície urbana (telhado e cânion) na temperatura do ar a 2 metros e na ICU.

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para este estudo, faz-se necessário conhecer as características do clima urbano, o conceito de cânion e sua representação em alguns esquemas urbanos, bem como a revisão dos principais estudos para a RMSP que servem de base para o desenvolvimento do presente trabalho.

#### 2.1 Clima Urbano

O clima urbano é ocasionado por quatro principais fatores: a mudança da cobertura natural do solo pelo uso de materiais impermeáveis das construções e pavimentação (como asfalto e concreto); a diminuição da área vegetada; a redução da radiação de onda longa emitida pela superfície do tipo cânion; emissão de calor antrópico e da poluição do ar (KUTTLER, 2008).

A superfície urbana é altamente não homogênea e varia em uma gama de escalas espacias (HARMAN, 2003). O conceito de escala no clima urbano é importante devido à interação entre os elementos de superfície com camadas atmosféricas adjacentes. No contexto de escala da atmosfera urbana, a evolução da CLP é de fundamental importância. Ela é definida como parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra, e responde às forçantes superficiais com uma escala de tempo de uma hora ou menos (STULL, 1988). Particularmente, quando a CLP é influenciada por uma superfície urbana, ela passa a ser denominada Camada Limite Urbana (CLU) (OKE, 1982). Oke (1988) apresentou uma distinção entre a CLU e a camada limite do dossel urbano (CLD), para o contexto de estudo de Ilha de Calor, quando a principal causa da formação da ICU é a alteração do balanço de energia. A CLD compreende o nível do solo até o telhado, sendo controlada por processos de microescala, como os fluxos de momento e energia entre as paredes das construções, as ruas e o ar adjacente. A CLU encontra-se acima do nível do telhado das construções, e é influenciada por processos de escalas maiores, como a mesoescala. De acordo com Harman (2003), a CLU é dividida em 3 subcamadas: Sub-camada Rugosa, Sub-camada Inercial e Camada de Mistura, as quais são decompostas em função das características dos perfis verticais das médias das variáveis dinâmicas e termodinâmicas dos fluxos turbulentos.

#### 2.1.1 Balanço de Energia na Superfície (BES)

Estudos como Oke (1973) e Oke (1982) evidenciaram que uma das principais causas da formação da ICU é a alteração do balanço de energia na CLU e CLD, quando

comparado com as regiões rurais adjacentes. Nas áreas urbanas, uma fonte de energia extra, associada com a atividade antrópica, é levada em conta para a intensificação do aquecimento na superfície e formação da ICU. Oke (1988) propôs a formulação do balanço de energia para uma superfície urbana total:

$$Q * +Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \tag{2.1}$$

em que  $Q^*$  é o saldo de radiação,  $Q_F$  é o fluxo de calor antrópico,  $Q_H$  é o fluxo de calor sensível,  $Q_E$  é o fluxo de calor latente,  $\Delta Q_S$  é o fluxo de calor armazenado no solo e  $\Delta Q_A$  é o fluxo de calor advectivo. A Figura 2.1 apresenta o esquema da abordagem média volumétrica para o BES urbana proposto por Oke (1988).

Figura 2.1 - Representação esquemática da abordagem média volumétrica para o balanço de energia urbana.



Fonte: Oke (1988).

A geometria urbana que aprisiona calor e que diminuem a velocidade dos ventos, a mudança da superfície natural para artificial altera rugosidade superfíciel do tecido urbano, superfícies impermeáveis com propriedades das superfícies (albedo e a emissividade), bem como as propriedades térmicas do material (condutividade, capacidade e admitância térmica) são considerados fatores que contribuem para a formação da ICU. Todos estes fatores, e outros, são responsáveis por alterações no balanço de energia das cidades, pois interferem diretamente nos processos de troca de momento, massa e energia nas superfícies urbanizadas.

### 2.1.2 Ilha de Calor Urbana

As ICU's são formadas em áreas urbanas e suburbanas e possuem temperaturas do ar e da superfície mais elevadas do que em áreas rurais circundantes, com efeitos mais intenso em dias de céu claro e ventos calmos. A diferença entre as temperaturas do ar urbanas e rurais, são comumente denominadas de Intensidade da ICU (IICU). Na Figura 2.2 pode-se observar um esquema ilustrativo da variação da temperatura do ar em diferentes ambientes urbanos.





Fonte: Adaptado de Heat Island Group – Lawrence Berkley National Laboratory (http://heatisland.lbl.gov).

O efeito de ICU tem sido alvo de diversos estudos, tanto observacionais quanto numéricos. A modelagem da Ilha de Calor em áreas urbanas é complexa e requer parametrizações que levem em consideração os detalhes tridimensionais das grandes cidades.

### 2.1.3 Parametrizações urbanas

Com a crescente evolução dos modelos de PNT, principalmente em termos de aumento da resolução espacial, as pesquisas recentes relacionadas ao BES urbana tem avançado consideravelmente (HARMAN; BELCHER, 2006) e muitos estudos vêm sendo realizados no âmbito da simulação numérica da ICU. Segundo Masson (2006), os modelos urbanos ou esquemas de superfície são classificados em cinco categorias principais, a saber: i) os modelos empíricos, os quais se baseiam em observações do BES para a realização de experimentos estatísticos; ii) os esquemas de vegetação modificado com o termo de arrasto do dossel; iii) os esquemas de vegetação modificado sem o termo de arrasto do dossel; iv) novos esquemas de dossel urbano que apresentam superfícies horizontais e verticais com o termo de arrasto do dossel e v) novos esquemas de dossel urbano que apresentam superfícies horizontais e verticais com o termo de arrasto do dossel. A partir do ano de 2000, a superfície urbana passou a ser representada nos esquemas urbanos como uma superfície denominada de "cânion" (MASSON, 2000; MARTILLI et al., 2002; BEST, 2005; BEST et al., 2006; HAR-MAN; BELCHER, 2006; PORSON et al., 2010; KARAM et al., 2010). O conceito de cânion citado primeiramente por Oke (1981), considera uma estrutura como "quadro", onde a rua é delimitada em frente por edifícios.

Alguns esquemas de parametrização urbana utilizados em modelos de PNT trata a área urbana separadamente levando em consideração as interações dinâmicas e termodinâmicas do cânion. O esquema *Town Energy Budget* (TEB) proposto por Masson (2000) é um modelo de dossel urbano de uma camada, e as características urbanas mais importantes consideradas neste esquema são os seguintes (MASSON, 2000): as construções (prédios) têm as mesmas alturas e larguras (dimensões); as construções estão localizadas ao longo de ruas idênticas, das quais o comprimento é considerado bem maior que a largura, sendo o espaço entre as faces de duas construções definido como cânion; ruas independentes da orientação e igualmente prováveis. Para a sua inicialização, TEB requer dados de parâmetros geométricos, radiativos e térmicos.

O esquema proposto por Martilli et al. (2002) representa a cidade como, pelo menos, uma classe ou combinações de classe urbana, caracterizada pelos seguintes parâmetros: forma do cânion da rua, expressos em termos da distância entre as fileiras de construção, e a forma dos edifícios, expressa em termos de largura do telhado e altura da parede; distribuição da altura do edifício; orientação da rua (é possível considerar diversas orientações por classes) e propriedades dos materiais (difusividade térmica, capacidade de calor, albedo e emissividade para os três tipos de elementos urbanos, ou seja, rua, parede e telhado).

O esquema t-TEB (*tropical TEB*) (KARAM et al., 2010) foi desenvolvido para ser incorporado ao modelo de previsão de tempestade *The Advanced Regional Prediction* 

System (ARPS). Esse modelo fisicamente construído para o clima tropical, visa uma melhor representação do BES em cidades tropicais. Neste esquema, foram incluídas modificações a partir das equações originalmente desenvolvidas por Masson (2000).

Harman and Belcher (2006) desenvolveram um modelo urbano para o cálculo do BES em áreas urbanas, representado como uma sequência de cânions de rua bidimensionais. O modelo incorpora uma nova formulação para o fluxo de calor sensível, que foi previamente validado com modelos em túnel de vento (HARMAN et al., 2004), e uma formulação para a radiação que inclui múltiplas reflexões e sombreamento (HARMAN, 2004). Este modelo de balanço de energia está acoplado a um modelo de camada limite atmosférica.

A área urbana em modelos de PNT operacional passou a ser resolvida com a introdução do conceito de *tile* (ou mosaico) onde é possível calcular processos de superfície para frações distintas de cobertura do solo, incluindo a superfície urbana. Best (2005) apresentou uma parametrização para o balanço de energia urbano em modelos de PNT operacionais. Ela foi implementada dentro do modelo operacional de mesoescala do serviço meteorológico do Reino Unido, o Met Office incluindo no modelo de superfície JULES. A superfície urbana é parametrizada fundamentalmente da mesma maneira como uma superfície de solo nu, com exceção de que os parâmetros de superfície são ajustados de tal forma a serem apropriados para uma superfície urbana. O esquema é ideal no contexto operacional, uma vez que é fácil de implementar e apresenta baixo custo computacional. Best et al. (2006) mostraram que a representação de duas faces ou superfícies (2T) resulta em uma melhora eficaz nos resultados em relação ao esquema de uma face. No esquema 2T, a área urbana é representada com uma combinação de cânion e telhados, onde o balanço de energia em cada superfície é calculado separadamente. De forma similar o Met Office-Reading Urban Surface Exchange Scheme (MORUSES) proposto por Porson et al. (2010) teve o propósito de melhorar a compreensão do impacto da área urbana na PNT e da modelagem climática regional. De forma similar ao esquema 2T, o MORUSES é um esquema de duas camadas. Porém os parâmetros de superfície são determinados a partir da morfologia e das propriedades do material da área urbana permitindo a distribuição dos fluxos de superfície com diferentes propriedades estruturais.

### 2.2 RMSP

Como destacado anteriormente, a RMSP é a maior aglomeração urbana da América Latina e a sétima do mundo, composta por 39 cidades e uma área aproximada de 8000 km<sup>2</sup>. A topografia é dominada por colinas que variam entre 650 e 1200 m de altura. Na Figura 2.3, observa-se a visão tridimensional da RMSP com a Serra da Mantiqueira ao norte e Serra do Mar ao sul. Em média, a RMSP está a 750 metros acima do nível do mar. A região mais alta é observada na Serra da Mantiqueira com 1200 metros.



Figura 2.3 - Mapa da topografia tridimensional da RMSP, com Serra da Mantiqueira e Serra do Mar.

O regime de ventos é determinado por ventos de N-NE durante o verão e de NE-E durante o interno (MORAIS, 2014). Os ventos médios são fracos e favorecem a formação e desenvolvimento de circulações locais associadas aos efeitos topográficos e de ocupação do solo. A brisa marítima e as circulações entre a região plana e a montanha produzem forte variação diurna no campo de vento nos baixos níveis (superfície). Também fatores como a proximidade da RMSP com o Oceano Atlântico e a intensa urbanização nessa região influenciam ainda mais o padrão de circulação atmosférica (SILVA, 2016).

#### 2.2.1 Resultados de estudos anteriores para a região de interesse

A literatura abordando, direta ou indiretamente, a questão da ICU na RMSP tem se expandido nas últimas duas décadas. Freitas and Dias (2005) utilizando o modelo *Regional Atmospheric modeling System* (RAMS), desenvolvido na *Colorado State*
University (CSU) acoplado ao esquema urbano TEB, verificaram que existe dependência entre a dimensão da área urbana e suas diferenças de temperatura em relação às vizinhanças. A diferença de temperatura obtida da simulação com e sem cidade demonstram a semelhança entre os contornos de temperatura e aqueles observados em uma ilha do mar (Figura 2.4). Verificou-se que a área urbana altera a altura CLP, que pode ser de cerca de 150 m mais alta que seria no caso de uma área vegetada nos dias em que as emissões antrópicas são menos intensas. Em situações de altas concentrações de poluentes, a diferença pode chegar a até 400 m (ou mais). Próximo à superfície, o comportamento do vento também sofre influência da superfície urbana, chegando ser 1m/s menos intenso que em regiões com outro tipo de superfície (mata aberta por exemplo) no período diurno. Porém, durante a noite, a situação se inverte e a intensidade do vento chega a ser 1,8 m/s mais intensa na área urbana.

Figura 2.4 - Diferença de temperatura no primeiro nível vertical do modelo considerando e desprezando o efeito da cidade.



Fonte: Freitas and Dias (2005).

Por sua vez, Marciotto (2008) realizou simulações para RMSP com um modelo de fechamento de segunda ordem, acoplado a um modelo de dossel urbano (MDU) baseado no TEB, com a finalidade de avaliar o impacto da cobertura vegetal e da geometria do dossel urbano na estrutura vertical da CLU. Para isso, variou-se a

fração de área vegetada presente na superfície urbana e a razão geométrica. Em relação à geometria, foi mostrado que seu efeito pode ser um fator preponderante sobre o vento, temperatura e fluxos turbulentos. Quando utilizado razão geométrica elevada, ou seja, construções altas, há a tendência de reduzir a temperatura e o fluxo de calor sensível à superfície. Isso está diretamente associado ao ciclo diurno do vento, uma vez que o aumento da razão geométrica implica em um maior coeficiente de arrasto e maior armazenamento de calor.

Morais (2014) realizou testes de sensibilidade utilizando o BRAMS acoplado ao modelo de interação de dossel urbano-atmosfera TEB modificando parâmetros de superfície, razão geométrica, índice de vegetação por diferença normalizada (do acrônimo em inglês Normalized Difference Vegetative Index, NDVI) e tipo de vegetação para a RMSP. Foram realizados diferentes testes de sensibilidade, os quais consideraram: (i) a modificação no material das construções por meio da variação do albedo, da emissividade, da capacidade térmica e condutividade térmica da superfície da parede, rua e telhado; (ii) a modificação na estrutura urbana por meio da razão geométrica; (iii) a modificação na vegetação utilizando variação no NDVI e tipo de vegetação. Os resultados foram comparados com uma simulação controle, por meio da análise no efeito da ICU e do conforto térmico humano para ambientes externos. O primeiro teste de sensibilidade avaliado por Morais (2014) foi alterando o valor do albedo do telhado, modificando para um valor extremamente baixo, de 0,08, simulando um "telhado de asfalto" e um valor alto de 0,90, recriando a proposta de "telhado branco". O efeito da refletividade no telhado branco reduziu a ICU em até 1°C. Outro teste aumentando o valor da emissividade para 1, resultou em uma ICU menos intensa. Aumentando a capacidade térmica e a condutividade térmica por um fator de 10, reduziu-se a intensidade da ICU. Para avaliar o impacto na razão geométrica variou-se o valor controle para metade e também o dobro. Em ambos os casos, foi identificado que pequenas alterações nas características dinâmicas e termodinâmicas das superfícies e da vegetação podem contribuir para uma redução da ICU e alterar a sensação térmica percebida pelas pessoas.

Estudos envolvendo a expansão da mancha urbana também têm sido conduzidos no sentido de analisar seus efeitos no microclima local. Homann (2014) utilizou o modelo de mesoescala *Weather Research and Forecasting* (WRF) versão *Advanced Research* (ARW) para analisar os possíveis efeitos da expansão da mancha urbana - passada e futura - na modificação dos padrões no inverno e verão do ano de 2007 com e sem o acoplamento de um modelo de dossel urbano (MDU). Para isto, introduziu-se diferentes manchas urbanas no modelo, supondo nenhuma urbanização, urbanização

observada em 1952 e em 2007, bem como uma projeção de urbanização para o ano de 2030 para a RMSP. Nas duas estações do ano analisadas, observou-se a influência da expansão da mancha urbana nos eventos de brisa marítima. No inverno, as simulações com o MDU foram dispensáveis enquanto que a caracterização da mancha urbana apresentou melhores resultados quando comparado as simulações com dados observados de temperatura e umidade relativa para algumas regiões. Para o verão, os resultados observados tiveram um comportamento inverso ao do inverno. A simulação com o MDU apresentou-se mais fidedignas à realidade do que quando a parametrização estava desativada e os diferentes tipos de urbanização não representaram diferenças significativas. Para as duas estações analisadas, quanto maior a mancha urbana, maior o tempo de incursão da brisa marítima na região central da RMSP e a propagação continente adentro.

Um importante fator para as condições favoráveis à formação da ICU é a alta concentração de poluentes na atmosfera da área urbana. Silva (2016) analisou os efeitos combinados da ICU e da poluição do ar nas condições atmosféricas locais da RMSP por meio de dados observados e numéricos. A partir de métodos da análise observacional para a primavera de 2010 e 2011, foram evidenciados em média que a concentração dos poluentes aumenta com o aumento da IICU, uma vez que uma ilha de calor bem configurada induz à circulação de brisa urbana. Esta é caracterizada pela convergência dos ventos na superfície da área urbana e divergência no topo da CLP da área urbana. Essa circulação caracterizada pela convergência do ar quente na área urbana e transporte de ar frio, causa acumulo dos precursores de ozônio, bem como outros poluentes do ar, o que agrava a qualidade do ar na região. Em seu estudo, Silva (2016) implementou três esquemas de parametrização urbana, a saber: o esquema 1T, 2T e MORUSES no BRAMS versão 5.0. Para os experimentos numéricos, o período de estudo compreendeu os dias 26 a 30 de setembro de 2011, divididos em 2 casos: primeiro correspondente aos dias 26 e 27 de setembro, dias que ocorreram registros de temperaturas amenas, ocorrência de névoa úmida, com a presença algumas nuvens médias e altas e uma ilha de calor mais baixa de cerca de 2,6°C em média, enquanto no segundo caso de estudo, que compreendeu os dias 29 e 30 de setembro, foram registradas temperaturas mais elevadas na RMSP, predominância de céu claro e uma ilha de calor mais intensa de 3,5°C em média. Silva (2016) destacou que todos os esquemas urbanos representaram satisfatoriamente a ICU na RMSP, sendo que os esquemas com configuração bidimensional (cânions e telhados) apresentaram resultados mais coerentes às características da área urbana. Porém ainda era necessário incluir testes de sensibilidade que avaliem os efeitos dos parâmetros urbanos na ICU com objetivos de aperfeiçoar as simulações de ICU. Dessa forma, o presente trabalho estará colaborando a dar continuidade de trabalhos já realizados no CPTEC/INPE.

# **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Neste capítulo são descritos os dados e as ferramentas utilizadas que fundamentam e sustentam a metodologia proposta.

#### 3.1 Modelo Atmosférico BRAMS

O modelo regional BRAMS resulta de um projeto comum entre diversas instituições brasileiras, entre elas, o CPTEC/INPE, apoiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Ele é baseado na versão 6 do *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) (WALKO et al., 2000). O RAMS foi desenvolvido para simular circulações atmosféricas variando da escala planetária até simulações de grandes turbilhões (do inglês *Large Eddy Simulations* - LES) da CLP (WALKO et al., 2000). É constituído das equações não-hidrostáticas quasi-Boussinesq descritas por Tripoli and Cotton (1982). O modelo possui um complexo conjunto de módulos para simular processos, tais como transferência radiativa, troca de água, calor e *momentum* entre a superfície e a atmosfera, bem como transporte turbulento na CLP e microfísica das nuvens (FREITAS et al., 2009).

Diversas funcionalidades especializadas para a América do Sul foram inseridas ao RAMS para que o modelo pudesse ser aplicado aos trópicos e subtrópicos, resultando no modelo BRAMS (FREITAS et al., 2009). Uma delas foi a inclusão da parametrização de convecção rasa e profunda do tipo *ensemble* de Grell and Freitas (2014). Outra implementação que contribuiu para o ganho de desempenho do modelo foi a inclusão da inicialização heterogênea da umidade do solo (GEVAERD; FREITAS, 2006) a partir de dados provenientes de sensoriamento remoto da atmosfera em conjunto com um modelo de superfície. Além disso, os mapas de uso do solo foram atualizados para a Bacia Amazônica com dados fornecidos pelo projeto PROVEG (SESTINI et al., 2003), enquanto que o tipo de solo no Brasil é obtido do projeto Radar na Amazônia Brasil (RADAMBRASIL) (ROSSATO et al., 2002). Nas demais regiões são utilizados os mapas de uso do solo do Olson Global Ecosystem (OGE) (OLSON, 1994). Os dados de NDVI são derivados dos dados do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) dos anos de 2001-2002 e processados pelo Terrestrial Biophysics and Remote Sensing (TBRS) (tbrs.arizona.edu). O BRAMS foi totalmente acoplado ao modelo Coupled Aerosol and Tracer Transport (CATT), resultado dos trabalhos de Longo (1999) e Freitas (1999). Hoje, o modelo é uma versão integrada que une o modelo CATT-BRAMS ao modelo de superfície JULES (MOREIRA et al., 2013; FREITAS et al., 2017). Em sua versão 5.2, lançada em março de 2016, conta-se com o estado da arte em processos de superfície e modelagem de tempo químico de forma

operacional no CPTEC/INPE para a produção de previsões de tempo e qualidade do ar. Maiores detalhes a respeito do modelo podem ser encontrados em Freitas et al. (2009), Longo et al. (2013), Moreira et al. (2013), Freitas et al. (2017).

## 3.1.1 Configuração utilizada

Tendo em vista a necessidade de se considerar um padrão de referência da ICU para a análise dos experimentos de sensibilidade, será realizado um experimento controle adotando-se o período de estudo, a configuração utilizada no modelo BRAMS e os parâmetros urbanos baseados no estudo realizado por Silva (2016) com a versão 5.0 do BRAMS para a RMSP.

Foi realizada uma simulação de 240 horas à partir das 00:00 UTC do dia 23 de setembro a 01 de outubro de 2011 às 00:00UTC. A configuração adotada conta com a versão 5.2 do BRAMS, dados de topografia do *United States Geological Survey's-Earth Resources Observation Systems* (USGS-EROS) com espaçamento horizontal de 1km, condições iniciais (CI) e de contorno (CC) provenientes das reanálises do ERA-INTERIM do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (DEE et al., 2011), no espaçamento horizontal de  $0,25^{\circ}$  em intervalos de 6 horas. As simulações foram realizadas em duas grades, a partir o processo de *downscaling* dinâmico das reanálises para o domínio com espaçamento de grade de 5km e por fim para uma grade com espaçamento horizontal de 1km. A primeira grade (Figura 3.1a) é centrada em 46,6°W e 23,6°S, abrangendo parte das Regiões Sudeste Sul do Brasil, com número de pontos em x e y de 170 e 111, respectivamente. O segundo domínio compreende a RMSP (Figura 3.1b) possui 140x140 pontos em x e y e é centrado em 46.6°W e 23.7°S, correspondendo à RMSP.

Figura 3.1 - Domínios utilizados nas simulações realizadas: a) domínio com espaçamento de grade de 5km que abrange Regiões Sudeste e Sul do Brasil e b) domínio com espaçamento de grade de 1km sobre a RMSP.





(b)

As parametrizações e condições de inicialização necessárias para as simulações são especificadas na Tabela 3.1.

| Número de pontos na região        | 25  |
|-----------------------------------|---|
| de Fronteira lateral utilizados   |   |
| para <i>nudgind</i>               |   |
| Escala de tempo de <i>nudging</i> | 900 s                                     |
| nas fronteiras laterais           |   |
| Parametrização de radiação        | RRTMG (IACONO et al., 2008)               |
| de onda curta/longa               |   |
| Frequência de atualização         | 1200 s                                    |
| na tendência da radiação          |   |
| Parametrização de Cumulus         | Esquema Grell and Freitas (2014)          |
|                                   | Ativa no domínio 1                        |
| Microfísica                       | Greg Thompson (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014) |
|                                   | cloud water single moment                 |
|                                   | Nível de complexidade 3                   |
| Inicialização de umidade          | Inicialização heterogênea                 |
|                                   | de Gevaerd and Freitas (2006)             |
| do solo                           |   |
| Parametrização de Turbulência     | Deformação Horizontal                     |
|                                   | Esquema de Mellor and Yamada (1974)       |
|                                   | Mellor and Yamada (1982)                  |
|                                   |   |

Tabela 3.1 - Configuração das simulações utilizadas no experimento de referência (EXP-controle)

Além da simulação controle, foram realizadas simulações com as configurações de 5km e 1km que estiveram em operação no CPTEC durante os Jogos Olímpicos 2016 até março de 2017, destinadas para a realização de previsões de qualidade do ar em altíssima resolução espacial para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (FRASSONI et al., 2016). As principais diferenças entre as configurações do Controle e a operacional (OPER) são apresentadas na Tabela 3.2. A configuração operacional foi também utilizada para analisar o seu desempenho para a RMSP, uma vez que esta se diferencia em diversos aspectos da RMRJ. O objetivo dessa comparação é analisar se a configuração operacional adotada para uma área urbana distinta poderia ser aplicada também para a RMSP ou se seria necessário adaptação da versão operacional para aplicação em previsão de tempo especificamente para esta área urbana. A simulação OPER consistiu do uso da configuração em comparação ao experimento Controle.

| Configuração                             | EXP-Controle     | OPER           |
|--|------------------|----------------|
| Níveis verticais                         | 41               | 45             |
| em coordenadas sigma-z                   |                  |                |
| Espaçamento da grade vertical (DELTAZ)   | 70               | 80             |
|  |                  |                |
| Número de pontos para nudging            |                  |                |
| nas fronteiras laterais                  | 25               | 20             |
| Escala de tempo para nudging             |                  |                |
| nas fronteiras laterais                  | 900s             | 3600s          |
| Escala de tempo para nudging             |                  |                |
| no topo do domínio                       | 10800s           | 3600s          |
| Esquema de advecção – ADVMNT             | não monotônica 0 | monotônica 1   |
|  |                  |                |
| Parametrização de cúmulus rasos (NNSHCU) | 3                | 2              |
|  | (Grell-Freitas   | (Grell-        |
|  | scheme)          | Deveny scheme) |

Tabela 3.2 - Diferenças na configuração do EXP-Controle e da simulação com a versão versão operacional do CPTEC

## 3.2 Modelo de superfície JULES

O modelo BRAMS conta com a versão 3.0 do modelo JULES (BEST et al., 2011; CLARK et al., 2011), o qual representa os processos de interação entre a superfície e a atmosfera, totalmente acoplado (MOREIRA et al., 2013; FREITAS et al., 2017). Evoluído do *Met Office Surface Exchange Scheme* (MOSES), este modelo simula a física dos processos superficiais, como o balanço de água e energia na superfície. A descrição completa do modelo pode ser encontrada em Best et al. (2011) e Clark et al. (2011). Na Figura 3.2 é mostrado um esquema ilustrativo de como os processos são modulados pelo JULES de acordo com a representação física. A cor azul representa os processos que estão relacionados à hidrologia; a verde refere-se aos processos que envolvem diretamente a vegetação e a violeta é referente aos gases e aerossóis. 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 e as setas na camada superior indicam os fluxos, gases e aerossóis que são trocados com o modelo atmosférico (MOREIRA et al., 2013).



Figura 3.2 - Diagrama ilustrativo da estrutura do modelo de superfície JULES.

Fonte: Moreira et al. (2013).

Visando a heterogeneidade da superfície, o JULES trata esta componente do sistema terrestre como uma gridbox, sendo que cada uma 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 a gridbox é uma média do resultado de todos os nove tipos de superfície. 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" (SILVA, 2016).

Para as simulações, cada grade é tratada como uma *gridbox* com dados de frações dos tipos de superfície, 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 denominado 1T (BEST, 2005) e duas camadas compreende dois esquemas: 2T (BEST et al., 2006) e MORUSES (PORSON et al., 2010). No presente trabalho, as características da superfície dos métodos urbanos 2T e MORUSES serão descritas e avaliadas. Nos esquemas de duas superfícies, a geometria urbana é tratada como duas superfícies: um cânion e um telhado. Na Figura 3.3 é ilustrado um esquema, em duas dimensões, da geometria bidimensional do dossel urbano, onde W representa a largura da rua, H a altura do prédio ou construções e R a combinação do comprimento entre a rua e o telhado.

Figura 3.3 - Geometria bidimensional simplificada do dossel urbano para o esquema de duas camadas.



Fonte: Porson et al. (2010)..

Nos esquemas urbanos, o BES é dado por:

$$C\frac{dT_*}{dt} = R_N - Q_H - Q_E - \Delta Q_S \tag{3.1}$$

em que  $T_*$  é a temperatura da superfície, ou dossel urbano, C é a capacidade térmica da área (J $K^{-1}m^{-2}$ ),  $R_N$  é o saldo de radiação,  $Q_H$  é o fluxo turbulento de calor sensível,  $Q_E$  é o fluxo de calor latente e  $\Delta Q_S$  é o fluxo de calor armazenado dentro do dossel urbano.

De acordo com Porson et al. (2010), quatro processos parametrizados caracterizam o esquema urbano 2T: (i) a troca da radiação de onda curta dentro do cânion (cálculo da radiação solar líquida para o cânion); (ii) a troca de radiação de onda longa dentro do cânion (cálculo do saldo de radiação de onda longa para o *tile* cânion); (iii) a transferência de fluxo de calor sensível através de uma rede de resistência para

o cálculo do fluxo de calor sensível; (iv) a inércia térmica e o acoplamento com o solo subjacente para os termos residuais de armazenamento e fluxo de calor do solo.

O esquema urbano MORUSES calcula o balanço de energia separado para cânions e telhado, permitindo assim que haja variação na grade de acordo com a razão geométrica do cânion. A troca radiativa e a transferência de calor são baseadas nos estudos de Harman (2004) e Harman et al. (2004) (ver Porson et al. (2010) para uma descrição detalhada do módulo urbano). O cânion é considerado uma caixa fechada (2D) com quatro faces (uma rua, duas paredes e um céu). Uma única orientação da rua é evitada e assim leva-se em conta a orientação média dos cânions. A transferência de calor é representada por uma rede de resistências (Figura 3.4), a superfície do cânion inclui efeitos de diferentes regimes de vento, tais como recirculação de fluxo e ventilação (HARMAN et al., 2004). A inércia térmica e o acoplamento entre as faces urbanas e do solo subjacente dependem das propriedades térmicas da face e portanto são calculadas separadamente para o cânion e telhado. Figura 3.4 - Geometria bidimensional do modelo de resistência utilizado no esquema MO-RUSES, considerando: a) ampla geometria de cânion com ambas as regiões de ventilação e de recirculação; b) um cânion estreito, com uma região de recirculação.



Fonte: Porson et al. (2010).

# 3.3 Estudos de sensibilidade

Para avaliar o desempenho dos esquemas 2T e MORUSES na descrição dos processos físicos associados à IICU sobre a região de estudo, a metodologia consiste em experimentos de sensibilidade com alteração de parâmetros que exercem influência, segundo a literatura (ROULET, 2004; MARCIOTTO, 2008; TAHA, 1997; MORAIS, 2014; SILVA, 2016), na representação da ICU em diferentes regiões. A avaliação qualitativa dos resultados será examinada separadamente. É importante salientar que a influência relativa é analisada em relação a cada tipo de superfície, tal que, uma vez modificada, as demais permanecem fixas com os valores de referência.

Tendo em vista que os dois esquemas de superfície utilizados (2T e MORUSES) apresentam diferenças entre si, como a dependência da geometria que é incluída

no MORUSES, serão realizados testes de sensibilidade para cada um dos esquemas individualmente. Desta forma, os resultados serão comparados no experimento do respectivo esquema.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 são listados os parâmetros utilizados nos testes de sensibilidade de cada simulação. Nota-se que o comprimento de rugosidade não será alterado uma vez que está fora do escopo do presente trabalho analisar as características associadas aos processos turbulentos dentro da Camada Limite Planetária (CLP).

Tabela 3.3 - Parâmetros da superfície urbana utilizados no esquema 2T para o experimento controle e testes de sensibilidade.

| Parâmetros                                    | EXP- controle | Teste de sensibilidade |
|---|---------------|------------------------|
| Fração do cânion– wrr                         | 0.5           | 0.5                    |
| Albedo cânion                                 | 0.12          | 0.25                   |
| Albedo telhado                                | 0.10          | 0.25                   |
| Fator de infiltração                          | 0.10          | 0.10                   |
| $z_0 	ext{ canion(m)}$                        | 3.00          | 3.00                   |
| $z_0$ telhado (m)                             | 1.00          | 1.00                   |
| Capacidade térmica cânion $(MJK^{-1}m^{-3})$  | 0.28          | 0.28 X 10              |
| Capacidade térmica telhado $(MJK^{-1}m^{-3})$ | 0.053         | $0.053 \ge 10$         |
| Emissividade cânion                           | 0.96          | 1.00                   |
| Emissividade telhado                          | 0.90          | 1.00                   |

Tabela 3.4 - Parâmetros da superfície urbana utilizados no esquema MORUSES para o experimento controle e testes de sensibilidade.

| Parâmetros                        | EXP-controle | Teste de Sensibilidade |
|-----------------------------------|--------------|------------------------|
| Fração do cânion– wrr             | 0.5          | 0.5                    |
| Razão Geométrica– hwr             | 1.0          | 0.1                    |
|                                   |              | 3.0                    |
|                                   |              | 5.0                    |
| Altura da construções $(m) - hgt$ | 10           | 2.0                    |
|                                   |              | 60                     |
|                                   |              | 100                    |
| Comprimento de rugosidade – ztm   | 3.0          | 3.0                    |
| Albedo na parede –albwl           | 0.10         | 0.10                   |
| Albedo na rua – albrd             | 0.05         | 0.05                   |
| Emissividade na parede –emisw     | 0.71         | 0.71                   |
| Emissividade na rua –emisr        | 0.95         | 0.95                   |

#### 3.4 Métodos de Separação de Fatores

Para analisar os efeitos das diferentes propriedades propostas nos experimentos de sensibilidade, o método de separação de fatores (STEIN; ALPERT, 1993) será utilizado para identificar a contribuição individual de cada um dos parâmetros na simulação do ciclo diurno da temperatura a 2 metros. Cada parâmetro modificado é um fator e também todas as possíveis combinações entre estes, para cada esquema urbano, são apresentadas separadamente nas seções seguintes. Cada parâmetro modificado é tratado como um fator que contribui para o efeito da ICU. Esta análise é necessária uma vez que a influência relativa dos efeitos entre superfícies relativas e a interação entre os fatores não é bem compreendida.

#### 3.4.1 Experimentos – 2T

Os estudos de Hamdi and Schayes (2008) e Roulet (2004) mostraram que a escolha das propriedades térmicas dos materiais tem um impacto sobre a temperatura do ar próximo ao solo, e portanto sobre a intensidade da ICU. Os fatores correspondem àqueles que têm impacto na temperatura do material, como a capacidade térmica, o albedo e a emissividade da superfície.

Os experimentos são divididos entre os parâmetros alterados em que f corresponde às modificações feitas no telhado e g no cânion como mostrado na Tabela 3.5. Nesta, "O"indica que o fator é incluído e "X"que o fator é mantido com o valor de referência do experimento controle (EXP–Controle), como indicado na Tabela 3.3.

O método de separação de fatores mostra uma aproximação consistente e simples para isolar os campos resultantes devido a qualquer interação entre fatores, como também entre fatores individuais, usando combinações lineares. De forma geral, para isolar os fatores (n) são necessárias  $2^n$  simulações. No esquema 2T, foram modificados a capacidade térmica  $(f_1,g_1)$ , emissividade  $(f_2,g_2)$  e albedo  $(f_3,g_3)$  ou seja  $2^3$ simulações. A metodologia de cálculo para 3 fatores consiste em uma simulação controle  $\hat{f}_0$ , quando os fatores estão mantidos com valores de referência. Deste modo, para isolar a contribuição dos fatores na temperatura a 2m, têm-se os seguintes campos: (i) a temperatura a 2 metros induzida pela alteração na capacidade térmica  $\hat{f}_1$ , para isolar a contribuição da capacidade térmica  $[\hat{f}_1 = f_1 - f_0]$ , (ii) induzida pela mudança no valor da emissividade  $\hat{f}_2$ , para isolar a contribuição da emissividade  $[\hat{f}_2 = f_2 - f_0]$ , (iii) campo de temperatura a 2m devido a mudança no albedo  $\hat{f}_3$ , para isolar a contribuição da albedo  $[\hat{f}_3 = f_3 - f_0]$ . Na Tabela 3.6 é resumido a metodologia de cálculo da contribuição dos fatores principais. Com três fatores, são necessárias oito simulações para o cânion e para o telhado. Como resultado, é obtido a separação de fatores para o efeito da ICU e toda a combinação possível destes. O fator  $f_{123}$ , por exemplo, é a contribuição devido à interação tripla entre os três fatores sob a avaliação no telhado, enquanto que o fator  $g_{123}$  é a mesma contribuição, exceto sob a avaliação no cânion.

Tabela 3.5 - Caracterização dos experimentos de sensibilidade utilizando o esquema 2T a partir da análise de separação de fatores, em que f corresponde às modificações feitas no telhado e g no cânion e "O"indica que a mudança no fator é incluído e "X"indica que é mantido o valor de referência.

| Experimento | Capacidade Térmica | Emissividade | Albedo |
|-------------|--------------------|--------------|--------|
| $f_0 = g_0$ | Х                  | Х            | Х      |
| $f_1$       | 0                  | X            | Х      |
| $f_2$       | Х                  | O            | Х      |
| $f_3$       | Х                  | X            | Ο      |
| $f_{12}$    | 0                  | O            | Х      |
| $f_{13}$    | 0                  | X            | О      |
| $f_{23}$    | Х                  | O            | Ο      |
| $f_{123}$   | 0                  | O            | Ο      |
| $g_1$       | 0                  | Х            | Х      |
| $g_2$       | Х                  | O            | Х      |
| $g_3$       | Х                  | X            | Ο      |
| $g_{12}$    | 0                  | O            | Х      |
| $g_{13}$    | 0                  | X            | Ο      |
| $g_{23}$    | Х                  | 0            | Ο      |
| $g_{123}$   | 0                  | 0            | Ο      |

## 3.4.2 Experimentos – MORUSES

Um parâmetro importante para descrever o grau de urbanização de uma região é a razão geométrica do cânion  $\left(\frac{H}{W}\right)$ . Ele é definido como a razão entre a altura dos edifícios (H) e a largura da rua (W), é conhecida por estar relacionada ao regime de escoamento (OKE, 1988) e ao controle térmico (OKE, 1981). Assim, a razão geométrica pode influenciar a ICU, como por exemplo, pelo aprisionamento da radiação incidente e consequentemente redução do albedo. Também, pode influenciar pelo aprisionamento da radiação de onda longa, fazendo com que parte da radiação seja absorvida pela superfície da área urbana. No esquema MORUSES, analisa-se a sensibilidade às mudanças na geometria com sua dependência nos parâmetros do material, impactando diretamente a temperatura do ar.

| Símbolo                 | Metodologia de cálculo   |
|-------------------------|--|
| $\hat{f}_0 = \hat{g_0}$ | $f_0$  |
| $\widehat{f}_1$         | $f_1 - f_0$  |
| $\widehat{f}_2$         | $f_2 - f_0$  |
| $\widehat{f}_3$         | $f_{3} - f_{0}$  |
| $\hat{f_{12}}$          | $f_{12} - (f_1 + f_2) + f_0$                                     |
| $\hat{f_{13}}$          | $f_{13} - (f_1 + f_3) + f_0$                                     |
| $\hat{f_{23}}$          | $f_{23} - (f_2 + f_3) + f_0$                                     |
| $\hat{f_{123}}$         | $f_{123} - (f_{12} + f_{13} + f_{23}) + (f_1 + f_2 + f_3) - f_0$ |
| $\hat{g_1}$             | $g_1 - g_0$  |
| $\hat{g_2}$             | $g_2 - g_0$  |
| $\hat{g_3}$             | $g_3 - g_0$  |
| $\hat{g_{12}}$          | $g_{12} - (g_1 + f_2) + g_0$                                     |
| $\hat{g_{13}}$          | $g_{13} - (g_1 + f_3) + g_0$                                     |
| $\hat{g_{23}}$          | $g_{23} - (g_2 + g_3) + g_0$                                     |
| $\hat{g_{123}}$         | $g_{123} - (g_{12} + g_{13} + g_{23}) + (g_1 + g_2 + g_3) - g_0$ |

Tabela 3.6 - Contribuições dos fatores principais, suas interações e método de cálculo no esquema urbano 2T.

Os experimentos de sensibilidade foram divididos em função da razão geométrica (Tabela 3.7). O experimento "Análise", denominado h, é definido com uma razão geométrica baixa (0,1), característica de uma região com construções baixas na paisagem aberta. A altura das construções é 2 metros e a largura da rua é de 20 metros. O experimento "Construções"(i) corresponde a uma área com intenso desenvolvimento urbano (razão geométrica 3, altura do prédios de 60 metros e largura das ruas de 20 metros). Como descrito por Marciotto et al. (2010), valores altos (maiores que 1) implicam em uma redução do transporte por advecção ou turbulência, além de indicar uma alta densidade populacional. O experimento "Edifícios Altos"(j) corresponde a um exemplo de desenvolvimento vertical de grande porte (razão geométrica = 5, com alturas das construções de 100 metros e largura da ruas de 20 metros).

Além da razão geométrica, a opção de calor antrópico é ativado como segundo fator a ser considerado. Para o experimento controle será mantida a razão geométrica igual a 1, com a altura das construções (H) de 10 metros e largura das ruas (W) de 10 metros (Tabela 3.4) e calor antrópico desativado. Resumidamente é mostrada na Tabela 3.8 a metodologia de cálculo dos fatores principais (razão geométrica e calor antrópico) e suas interações.

Tabela 3.7 - Caracterização dos experimentos de sensibilidade utilizando o esquema MO-RUSES a partir da análise de separação de fator, sendo que "O"indica que a mudança no fator é incluído e "X"indica que o fator é mantido com o valor de referência.

| Experimento       | Análise | Construções | Edifícios Altos | Calor Antrópico |
|-------------------|---------|-------------|-----------------|-----------------|
| $h_0 = i_0 = j_0$ | Х       | Х           | Х               | Х               |
| $h_1 = i_1 = j_1$ | Х       | Х           | Х               | О               |
| $h_2$             | 0       | Х           | Х               | X               |
| $i_2$             | Х       | О           | Х               | X               |
| $j_2$             | Х       | Х           | О               | X               |
| $h_{12}$          | Ο       | Х           | Х               | О               |
| $i_{12}$          | Х       | О           | Х               | О               |
| $j_{12}$          | Х       | Х           | О               | 0               |

Tabela 3.8 - Contribuições dos principais fatores do esquema urbano MORUSES, suas interações e método de cálculo.

| Símbolo                             | Metodologia de cálculo                        |
|-------------------------------------|---|
| $\hat{h_0} = \hat{i_0} = \hat{j_0}$ | $h_0, i_0,  j_0$                              |
| $\hat{h_1} = \hat{i_1} = \hat{j_1}$ | $h_1$ - $h_0$ , $i_1$ - $i_0$ , $j_1$ - $j_0$ |
| $\hat{h_2}$                         | $h_2$ - $h_0$                                 |
| $\hat{i_2}$                         | $i_2$ - $i_0$                                 |
| $\hat{j}_2$                         | $j_2$ - $j_0$                                 |
| $\hat{h_{12}}$                      | $h_{12}$ - $(h_1+h_2)+h_0$                    |
| $\hat{i_{12}}$                      | $i_{12}$ - $(i_1 + i_2) + i_0$                |
| $\hat{j_{12}}$                      | $j_{12}$ - $(j_1+j_2)+j_0$                    |

## 3.5 Estudo de Caso

A IICU é definida como a diferença da temperatura média horária entre uma área urbana/suburbana  $(T_u)$  e uma área rural/vegetada  $(T_r)$  (CAMILLONI; BARRUCAND, 2012), tal que:

$$ICU = \Delta T_{u-r} = T_u - T_r. \tag{3.2}$$

Para a análise da simulação da ICU durante o período de estudo, a estação meteorológica escolhida para representar a área urbana foi a estação de São Caetano, localizada no município de São Caetano do Sul, SP, enquanto que para a região rural/vegetada, a estação de referência utilizada foi a estação de Parelheiros, localizada em Palheiros, SP. O período de análise corresponde os dias 26 a 30 de setembro de 2011 dividido em dois estudo de casos. O primeiro corresponde aos dias 26 e 27 de setembro, quando ocorreram registros de temperaturas amenas, névoa úmida, algumas nuvens médias e altas e uma ICU de fraca intensidade (SILVA, 2016). No segundo caso de estudo, que compreende os dias 29 e 30 de setembro, foram registradas temperaturas elevadas na RMSP, céu claro na maior parte do período e uma ICU intensa (SILVA, 2016).

#### 3.6 Análise dos fatores na ICU

Para analisar a importância relativa de cada superfície e a influência dos fatores na ICU, a sensibilidade de cada parâmetro foi ponderada por meio do  $\Delta$  (HAMDI; SCHAYES, 2008), definido como a diferença da ICU entre um experimento controle  $ICU_c$  e um experimento de sensibilidade ICU, tal que:

$$\Delta = ICU_c - ICU, \tag{3.3}$$

em que o subíndice c é referente ao experimento controle e ICU=  $\Delta T_{u-r}$ . Nota-se que apenas a influência dos fatores principais é analisada, com o objetivo de identificar a contribuição individual dos parâmetros no efeito da ICU.

## 3.7 Balanço de Energia na Superfície (BES) Urbana

O efeito das características das construções urbanas na representação do BES no JULES é calculado pelo conceito de *tile*, que permite verificar o comportamento das variáveis do balanço de energia específicas para a área urbana. Devido à grande complexidade da superfície, a Equação 2.1 não pode ser resolvida ponto a ponto. Assim, a formulação do BES é dada por:

$$Q_* = Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_S, \tag{3.4}$$

em que  $Q_*$  é o saldo de radiação,  $Q_H$  é fluxo de calor sensível,  $Q_{LE}$  é o fluxo de calor latente e  $\Delta Qs$  é o termo de armazenamento no dossel.

## 3.8 Análise Estatística

Para a avaliação estatística dos resultados da simulação Controle e da simulação OPER, foram utilizados métodos estatísticos: o viés médio, o erro quadrático médio (do inglês *Root Mean Square Error* - RMSE), o Coeficiente de Correlação (R) e o Teste de significância *t-student* nas quatro estações localizadas na RMSP, para os dois esquemas urbanos. Os dados observados de temperatura são provenientes da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Esse tipo de análise permite verificar a destreza das simulações comparadas com as observações em pontos na área urbana e também vegetada. A Figura 3.5 mostra as localizações das estações consideradas na análise estatística e o mapa de uso do solo no domínio de 1km. O arquivo de uso do solo possui espaçamento horizontal de 1km (OLSON et al., 1995). As estações urbanas utilizadas foram São Caetano do Sul (SC), Pinheiros (PIN) e Taboão da Serra (TB) e a estação de referência localizada na área vegetada é Parelheiros (PAR).

Figura 3.5 - Mapa de uso do solo com a localização das estações meteorológicas PAR, SC, PIN e TB (Superfície Urbana, Florestas tropicais, Gramíneas, Cerrado, Pântano, Água e Florestas temperadas).



• Viés

O Viés de um parâmetro ou Erro médio, é um índice que indica se a simulação está superestimando ou subestimando os dados observados, de acordo com o sinal do resultado, e é expresso como (WILKS, 2011):

$$Vi\acute{e}s = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (p_k - o_k) = (\bar{p} - \bar{o}), \qquad (3.5)$$

em que  $\bar{p}$  é a média da variável simulada e  $\bar{o}$  é a média da variável observada. O RMSE informa a maneira com que o valor previsto se aproxima do valor observado, e é expresso como a raiz quadrada do erro quadrático médio (WILKS, 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (p_k - o_k)^2},$$
(3.6)

em que n é o tamanho da amostra, k é o índice da posição dos dados e p e  $o_k$  forma definidos anteriormente.

• Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação (R) é um índice estatístico que permite verificar o grau de correlação entre os valores simulados e observados, além de verificar se a correlação é positiva ou negativa. As correlações foram feitas com o objetivo de verificar se os valores simulados e observados possuem uma associação linear.

A formulação utilizada para calcular o coeficiente de correlação de Pearson é:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^{n} (p_k - \bar{p})(o_k - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (p_k - \bar{p})^2 (o_k - \bar{o})^2}}$$
(3.7)

• Teste de significância *t*-student

Para avaliar se as mudanças realizadas nos testes de sensibilidade são significativas, será utilizado o teste t-student. Essa premissa é utilizada quando a série considerada segue uma distribuição normal, mas a variância da população é desconhecida. Nesse caso, é usada a variância amostral  $s^2$  e a estatística de teste passa a seguir uma distribuição t de Student. Sob a hipótese nula de que os valores médios de temperatura a 2 metros apresentados nos testes de sensibilidade são iguais aos valores médios do experimento Controle. Matematicamente, segundo Snedecor and Cochran (1989), é definido como:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{(s^2)^{1/2}} \tag{3.8}$$

em que  $\bar{X}$  é a média das diferenças,  $\mu_0$  é o valor testado da médias das diferenças.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões estão divididos em análise geral do experimento Controle; análise dos testes de sensibilidade das simulações de temperatura do ar a 2m por esquema urbano; análise da influência dos fatores capacidade térmica, albedo e emissividade, no esquema 2T, e geometria urbana e calor antrópico no esquema MORUSES na simulação da ICU e o BES urbana. Também é apresentando uma simulação com a versão operacional, como detalhado no Capítulo 3.

#### 4.1 Análise do Experimento Controle

Como já descrito no Capítulo 3, adotou-se o período de estudo de 26 de setembro a 30 de setembro de 2011, sendo o mês com maiores valores de IICU (SILVA, 2016). Nas Figuras 4.2 e 4.4 apresenta-se a comparação entre as simulações de temperatura do ar a 2 metros do BRAMS do experimento Controle, utilizando as parametrizações 2T e MORUSES, em relação às observações das estações São Caetano do Sul, Parelheiros, Pinheiros e Taboão da Serra. Na maior parte do período, os esquemas urbanos representam satisfatoriamente o ciclo diurno de temperatura para as estações, principalmente na estação de São Caetano (Figura 4.1), em que os máximos e mínimos estão bem representados. Na análise do índice de correlação, as simulações Controle-2T e Controle-MOR apresentaram coeficientes superiores a 0,92. Na estação Parelheiros (Figura 4.2), que se encontra em uma área vegetada, foram observadas pequenas diferenças entre as simulações. Para as estações Pinheiros (Figura 4.3) e Taboão da Serra (Figura 4.4) o modelo subestima consistentemente a temperatura mínima em ambos os esquemas, e de forma ainda mais acentuada com o esquema 2T.

A maior diferença entre a simulação de temperatura máxima e a observação em ambas as estações analisadas foi identificada no dia 28 de setembro. Segundo os dados SYNOP (dados de estações de superfície coletados nos horários sinóticos, codificados e distribuído para os diversos órgãos de meteorologia) disponibilizado pelo CPTEC reporta névoa seca para São Paulo e o METAR (dados da estação de superfície dos aeroportos de Guarulhos e Congonhas disponibilizados pela rede de meteorologia do comando da aeronáutica– REDEMET), nebulosidade durante todo o dia.

Dentre os esquemas urbanos, a simulação Controle gerada com o MORUSES apresenta menores erros principalmente para a temperatura máxima. Pode-se verificar que o modelo apresenta maior erro na simulação da temperatura mínima. Outros fatores, como a parametrização de turbulência, exerce influência no comportamento diurno desta variável e por isso deve ser melhor investigado em trabalhos futuros.

Figura 4.1 - Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros observada (linha preta) e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando os esquemas urbanos 2T (linha amarela) e MORUSES (linha verde) para a estação meteorológica de São Caetano.



Figura 4.2 - Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros observada (linha preta) e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando os esquemas urbanos 2T (linha amarela) e MORUSES (linha verde) para a estação meteorológica Parelheiros.



Figura 4.3 - Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros observada (linha preta) e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando os esquemas urbanos 2T (linha amarela) e MORUSES (linha verde) para a estação meteorológica Pinheiros.



Figura 4.4 - Comparação entre a série temporal de temperatura do ar a 2 metros observada (linha preta) e simulada no período de 26 a 30 de setembro de 2011 utilizando os esquemas urbanos 2T (linha amarela) e MORUSES (linha verde) para a estação meteorológica Taboão da Serra.



b. Simulação da Intensidade da Ilha de Calor Urbana

Na Figura 4.5(a) é mostrada a comparação da variação diurna da ICU simulada e observada para o período de 26 a 30 de setembro de 2011. Na simulação Controle-2T, observa-se que a IICU é superestimada entre as 9:00 HL e 16:00 HL, exceto no dia 27 de setembro, e subestimada nos períodos noturnos. A simulação Controle-MORUSES não representa os máximos e mínimos subestimados na maior parte do período de IICU.

Para o primeiro caso de estudo Figura 4.5(b), quando foram registradas temperaturas amenas e presença de névoa úmida, as simulações reproduziram o ciclo da IICU no primeiro dia (26/09), apesar de superestimado pelo 2T e subestimado pelo MORUSES, enquanto que no segundo dia ambos os esquemas mostraram um atraso em relação ao máximo da IICU. Na Figura 4.5(c) observa-se que o segundo caso de estudo não foi bem reproduzido, principalmente no dia 30/09 quando comparado à observação da IICU. Esse desempenho na simulação da IICU foi o mesmo descrito por (SILVA, 2016) com a versão 5.0 do BRAMS.

Figura 4.5 - Simulações da IICU a) para o período de 26 a 30 de setembro de 2011; b) caso de estudo referente aos dias 26 e 27 de setembro de 2011; c) caso de estudo referente aos dias 29 a 30 de setembro de 2011.



## 4.2 Testes de Sensibilidade

O método de separação de fatores foi utilizado na quantificação dos parâmetros urbanos para investigar as suas contribuições de forma individual e a influência exercida na temperatura do ar a 2 metros. É importante salientar que os testes de sensibilidade são aplicados para todos os pontos de grade que contêm área urbana dentro do domínio de 1km, porém, a discussão dos resultados é específica para a mancha onde se encontra a RMSP. Para a análise destes resultados, será utilizado um mapa espacial da diferença média do período de análise do Controle em relação ao experimento de sensibilidade, para os horários em que se identificou maior diferença. Também será analisada a contribuição dos fatores na temperatura do ar a 2 metros para uma área urbana média (23,5°S; 23,7°S e 46,5°W; 46,8°W).

A contribuição é dada pelo resultado do cálculo do método da separação dos fatores, indicando quanto o teste de sensibilidade em análise contribui para o aumento ou diminuição da temperatura do ar a 2 metros.

## 4.2.1 Esquema 2T

O primeiro teste de sensibilidade no esquema 2T foi realizado com a alteração da capacidade térmica do material por um fator de 10 referente às modificações no telhado  $(f_1)$  e no cânion  $(g_1)$ . O aumento deste parâmetro tem um impacto direto sobre a temperatura do material e portanto na temperatura do ar próximo à superfície. Como demonstrado em Hamdi and Schayes (2008) e Roulet (2004), em que compilaram valores de capacidade térmica para diferentes estudos, o aumento ou diminuição por um fator de 10 não é irrealista. Como pode ser visto a partir da compilação de valores de parâmetros no trabalho de Roulet (2004) para diferentes estudos (Tabela 4.1).

|  |          | $\mathbf{C}[\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{m}^{-3}\mathbf{K}^{-1}]$ |      |
|--|----------|--|------|
|  | Parede   | Telhado  | Rua  |
| Montilli                                   |          |  |      |
|  | 1.0      | 1.0  | 1 /  |
|  | 1,0      | 1,0  | 1,4  |
| Masson, Cidade do México                   |          |  |      |
| Asfalto                                    |          | 1,0  |      |
| Concreto (pedra)                           |          | 1,5  |      |
| Material isolante                          |          | $0,\!25$   |      |
| Gesso                                      |          | 0,87   |      |
| Pedra/janela                               | $1,\!54$ |  |      |
| Material isolante/janela                   | 0,32     |  |      |
| Asfalto concreto                           |          |  | 1,74 |
| Agregado de pedra                          |          |  | 2,0  |
| Cascalho e solo nu                         |          |  | 1,4  |
| Magaza Managara                            |          |  |      |
|  |          | 1 70   |      |
| Cascallio<br>Motorial Isolanta             |          | 1,70   |      |
| Concento                                   |          | 0,04   |      |
| Concreto<br>Comencia Demos                 | 0.11     | 2,21   |      |
| Concreto Denso                             | 2,11     |  |      |
| A falta (Cananata                          | 1,0      |  | 1 74 |
| Asiaito/Concreto                           |          |  | 1,74 |
| Agregado de Pedra                          |          |  | 2,0  |
| Cascalilo e solo nu                        |          |  | 1,4  |
| Dupont, Philadelphia                       |          |  |      |
| Mosaico de cerâmica(centro da cidade)      |          | 2,43   |      |
| Azulejo de ardósia (área residencial)      |          | 1,77   |      |
| Chapa metálica (área comercial-industrial) |          | 3,9  |      |
| Concreto (Altura das construções)          |          | 1,17   |      |
| Concreto                                   | 1,17     |  |      |
| Asfalto                                    |          |  | 1,94 |

Tabela 4.1 - Valores da capacidade térmica do material para diferentes estudos. As colunas contém os valores referente a cada tipo de superfície coletados das fontes. Adaptado de Roulet (2004).

Os mapas espaciais da diferença entre as simulações controle e os experimentos de sensibilidade no domínio de 1km, centrado sobre a RMSP, são mostrados na Figura 4.6. A mudança na capacidade térmica à noite considerando o telhado  $(f_1)$  gera

um aquecimento sobre a mancha urbana com valores máximos da ordem de 4°C na região central no horário das 00:00 UTC (Figura 4.6(a)). Materiais com alta capacidade térmica são capazes de armazenar mais energia e a configuração do tipo cânion faz com que no período noturno a liberação para a atmosfera livre seja lenta. Na simulação com a mudança no cânion ( $g_1$ ), foram observados valores de máximo aquecimento da ordem de 3°C. Verificou-se aquecimento na região central da ordem de 4°C às 09:00 UTC (Figura 4.6(b)). À medida que mais energia é armazenada, a temperatura do material aumenta. Portanto, os valores positivos na mancha urbana indicam radiação de onda longa liberada no período sem radiação solar. Durante o dia é observado sinal oposto no telhado (Figura 4.6(c)), com redução de 2-3°C em  $f_1$  às 15:00 UTC, período de máxima incidência de radiação solar. No cânion, verificou-se uma diferença de -4°C na temperatura do ar a 2 metros (Figura 4.6(d)) em  $g_1$  no horário das 16:00 UTC (uma hora depois do meio dia local) devido ao ângulo solar incidente.

A contribuição do teste de sensibilidade considerando a alteração da capacidade térmica na temperatura do ar a 2 metros na área urbana média é mostrada a partir da diferença em relação ao experimento Controle (Figura 4.7). Durante o dia, a mudança feita no telhado (linha com círculos fechados) e no cânion (linha contínua) apresenta um comportamento similar, com decréscimo de temperatura do ar próximo à superfície, destacando uma defasagem e um pico de máximo mais intenso do cânion. No período noturno, a contribuição da capacidade térmica é positiva, indicando que há aumento da temperatura do ar na área urbana entre 00:00 UTC e 11:00 UTC e de 19:00 UTC às 23:00 UTC. O teste *t-student* indicou que para o nível de confiança (NC) de 93% no experimento  $f_1$  e 99% no experimento  $g_1$  as diferenças são significativas. Figura 4.6 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração na capacidade térmica do telhado (painéis à esquerda) e cânion (painéis à direita). A capacidade térmica foi aumentada por um fator de 10. Os valores negativos e positivos na escala indicam, respectivamente, aumento e redução na temperatura do ar a 2 metros: a) às 00:00 UTC; b) às 09:00 UTC; c) às 15:00 UTC e d) às 16:00 UTC.



Figura 4.7 - Contribuição da capacidade térmica (aumentada por uma fator de 10) na temperatura do ar a 2 metros no experimento de sensibilidade  $\hat{f}_1$  com a mudança feita no telhado (linha com círculos fechados) e no cânion  $\hat{g}_1$  (linha contínua). As linhas representam a diferença entre o experimento Controle e o teste de sensibilidade em questão.



O segundo fator analisado foi a emissividade, que determina o comportamento térmico de um material, modulando a quantidade de radiação de onda longa emitida (HAMDI; SCHAYES, 2008). Foram realizadas duas simulações,  $f_2 e g_2$ , alterando o valor da emissividade para 1 no telhado e no cânion, respectivamente, assumindo que toda radiação absorvida por esta superfície é totalmente emitida. Este valor substituiu os valores controles assumidos de 0,96 no cânion e 0,90 no telhado. O mapa espacial da diferença de temperatura do controle e as simulações (Figura 4.8) ao meio dia local é muito pequena em magnitude (cerca de 0.2-0.4°C), com impacto sobre a redução da temperatura. Estes resultados são comparáveis à aqueles encontrados por Hamdi and Schayes (2008), utilizando o esquema urbano de Martilli et al. (2002). Portanto, a emissividade é um parâmetro que exerce um impacto na temperatura urbana no dossel urbano. O teste *t-student* indicou que as diferenças encontradas são significativas ao NC de 99%.

Quando analisado a contribuição individual da emissividade na área urbana média (Figura 4.9), observam-se diferenças de temperatura do ar a 2 metros sempre menores que  $0.2^{\circ}$ C na maior parte dos horários do dia (de 00:00 UTC às 15:00 UTC). Além disso, não foi observado um padrão diurno e noturno.

Figura 4.8 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração na emissividade (alterada para 1) do telhado (painéis à esquerda) e cânion (painéis à direita). Os valores negativos e positivos na escala indicam, respectivamente, aumento e redução na temperatura do ar a 2 metros às: a) e b) 00:00 UTC; c) 15:00 UTC e d) 16:00 UTC.





Figura 4.9 - Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o teste) considerando a mudança na emissividade (assumido valor de 1) na simulação da temperatura do ar a 2 metros no experimento de sensibilidade  $f_2$  (linha

O terceiro fator analisado no esquema urbano 2T foi o albedo, que é definido pela razão entre a radiação solar refletida pela superfície e a radiação solar incidente sobre ela. Normalmente albedos urbanos estão na faixa de 0,10-0,12, mas alguns lugares podem ser excedidos, exemplo de albedo altos são as cidades Norte-Africanas com valores de 0,30-0,45, enquanto que maior parte das cidades americanas e européias possuem albedos mais baixos entre 0,15-0,20 (TAHA, 1997). Para verificar o impacto do albedo no ciclo diurno da temperatura, as simulações foram realizadas alterando seu valor de referência (assumido ser de 0,10 para o telhado e 0,12 para o cânion) para um valor moderado para a área urbana (OKE, 1988). Em um caso  $(f_3)$ , o valor de albedo é modificado apenas para o telhado para o valor de 0,25. Em um segundo momento  $(g_3)$ , o valor albedo do cânion é alterado para 0,25, mantendo o valor de referência para o telhado. Os valores assumidos foram baseados nos estudo para área urbana de Taha et al. (1988) e Oke (1988). Na análise espacial da diferença entre as simulações Controle e os experimentos de sensibilidade para o horário das 15:00 UTC (Figura 4.10), é observado uma redução na temperatura com valores de 0.6-0.8 °C no telhado (Figura 4.10(a)) e às 16:00 UTC de 0.8 °C no cânion (Figura 4.10(b)). Um aumento no valor do albedo nas simulações acarretá uma maior reflexão de radiação e assim uma redução na temperatura.

A contribuição individual do albedo sobre a temperatura do ar a 2 metros na área urbana média (Figura 4.11) indica uma variabilidade diurna negativa em todo o período analisado, pequenas modificações tanto no telhado quanto no cânion. O valor máximo de contribuição é de  $-0.6^{\circ}$ C ao meio dia local (15:00 UTC). O teste t *-student* indicou que as diferenças entre os testes de sensibilidade e o Controle são significativas ao NC de 99% no telhado e cânion.

Figura 4.10 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração no albedo (assumido valor de 0,25) do a) telhado e b) cânion. Os valores negativos na escala indicam redução na temperatura às 15:00 UTC.





Figura 4.11 - Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o teste) considerando a mudança no albedo (assumido valor de 0,25) na simulação da temperatura do ar a 2 metros no experimento de sensibilidade  $\hat{f}_3$  (linha

Na análise da diferença das simulações  $f_{12} e g_{12}$ , o mapa espacial da interação entre a capacidade térmica e a emissividade (Figura 4.12) é similar em comportamento e magnitude ao mapa espacial da diferença dos experimentos  $f_1 \in g_1$ . Esta semelhança ocorre devido à emissividade ter uma influência muito menor quando comparada ao efeito exercido pela capacidade térmica. Verificou-se que em todo o período a contribuição dos fatores na temperatura do ar a 2 metros é muito pequena, sem um comportamento diurno bem definido (Figura 4.13), porém, significativas ao NC de 93% e 99%, respectivamente.
Figura 4.12 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração na capacidade térmica (aumentada por um fator de 10) e emissividade (alterada para 1) do telhado (painéis à esquerda) e cânion (painéis à direita). Os valores negativos na escala indicam aumento e valores positivos indicam redução da temperatura do ar a 2 metros às: a) 00:00 UTC; b) 09:00 UTC, c) 14:00 UTC e d) 16:00 UTC.



Figura 4.13 - Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o teste) considerando a mudança da capacidade térmica (aumentada por um fator de 10) e emissividade (assumido 1) na simulação da temperatura do ar a 2 metros no telhado  $\hat{f}_{12}$  (linha com círculos fechados) e no cânion  $\hat{g}_{12}$  (linha contínua).



Da análise do mapa espacial da interação entre os fatores capacidade térmica e albedo  $f_{13}$  e  $g_{13}$  (Figura 4.14), observa-se um aquecimento no período noturno, porém menos acentuado se comparado aos experimentos  $f_{12}$  às 00:00 UTC e  $g_{12}$  à 09:00 UTC. No telhado, a diferença é da ordem de 3°C e no cânion da ordem de 4°C na parte central da mancha urbana. Durante o dia observa-se um resfriamento na superfície entre 2 e 3°C no telhado e no cânion valores acima de 4° no horário das 15:00 UTC. Na Figura 4.15 é mostrada a contribuição da capacidade térmica e albedo. A contribuição no telhado gera valores positivos entre as 10:00 UTC e 18:00 UTC e no cânion entre 09:00 UTC e 17:00 UTC. Os valores máximos positivos durante o dia, apesar de pequenos, só foram observados neste teste de sensibilidade. Em relação ao tipo de superfície, o comportamento é similar, porém o telhado apresenta um atraso e valores menores comparado ao cânion. Figura 4.14 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração na capacidade térmica (aumentada por um fator de 10) e albedo (alterado para 0,25) do telhado (painéis à esquerda) e cânion (painéis à direita). Os valores negativos na escala indicam aumento e valores positivos indicam redução da temperatura do ar a 2 metros às: a) 00:00 UTC; b) 09:00 UTC; c) e d) 15:00 UTC.





As alterações conjuntas na emissividade e albedo  $(f_{23} e g_{23})$  geram diferenças entre o experimento Controle e os testes de sensibilidade que indicam que, apesar de os dois parâmetros contribuírem para o aumento da temperatura, não há interação entre eles. No período noturno não é observado aumento ou diminuição da temperatura na mancha urbana. Durante o dia, tanto para o telhado Figura 4.16 (a) e cânion Figura 4.16 (b) a interação desses dois fatores acarreta em uma diferença significativa ao NC de 99%, indicando uma diminuição da temperatura de aproximadamente 0.6-0.8°C e 0.8°C, respectivamente, no horário da 15:00 UTC. Na Figura 4.17 é mostrada a contribuição da interação entre o albedo e a emissividade. Os valores tanto nas modificações no telhado  $f_{23}$  e cânion  $g_{23}$  são pequenos (sempre próximo de zero), não sendo observado um ciclo diurno definido. Figura 4.16 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração na emissividade (alterada para 1) e albedo (alterado para 0,25) no a) telhado e b) cânion às 15:00 UTC. Os valores negativos na escala indicam aumento e positivos indicam redução da temperatura do ar a 2 metros.



Figura 4.17 - Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o teste) considerando a mudança da emissividade (alterada para 1) e albedo (alterado para 0,25) na simulação da temperatura do ar a 2 metros no telhado  $\hat{f}_{23}$  (linha com círculos fechados) e no cânion  $\hat{g}_{23}$  (linha contínua).



O campo espacial das diferenças entre o Controle e o teste de sensibilidade em que são modificados os três fatores (capacidade térmica, albedo e emissividade) no telhado  $(f_{123})$  e no cânion  $(g_{123})$  é mostrado na Figura 4.18. No horário das 00:00 UTC, é observado um aquecimento na mancha urbana tanto para o telhado (da ordem de 3°C, Figura 4.18(a)) quanto para o cânion (da ordem de 4°C, Figura 4.18(b)). Durante o dia, a modificação nos três fatores resulta em uma diminuição na temperatura, comportamento similar ao observado nos testes de sensibilidade em que um dos fatores é a capacidade térmica. Isso já era esperado uma vez que aumentar a capacidade térmica por um fator de 10 exerce maior influência na simulação da temperatura a 2 metros se comparado a um alto valor de albedo e emissividade. Tais diferenças são significativas ao NC de 97% no experimento  $f_{123}$  e 99% no  $g_{123}$ .

A contribuição da interação entre os fatores (Figura 4.19) é similar ao comportamento diurno observado no experimento de sensibilidade  $\hat{f}_3$  e  $\hat{g}_3$  (Figura 4.11). Observou-se uma pequena variabilidade diurna negativa em todo período, tanto para as modificações no telhado quanto para o cânion. Figura 4.18 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle e de sensibilidade considerando a alteração na capacidade térmica (aumentada por um fator de 10), emissividade (alterada para 1) e albedo (alterado para 0,25) no telhado (painéis à esquerda) e cânion (painéis à direita). Os valores negativos na escala indicam aumento e positivos indicam redução da temperatura do ar a 2 metros às a) e b) 00:00 UTC c) e d) 15:00 UTC.



Figura 4.19 - Contribuição do teste de sensibilidade (diferença entre o Controle e o teste) considerando a mudança da capacidade térmica (aumentada por um fator de 10), emissividade (alterada para 1) e albedo (alterado para 0,25) na simulação da temperatura do ar a 2 metros no telhado  $f_{123}$  (linha com círculos fechados) e no cânion  $g_{123}$  (linha contínua).



#### 4.2.2 Esquema Urbano MORUSES

As modificações na geometria permitiram realizar diferentes configurações urbanas. A primeira é descrita como "construções na paisagem aberta" com razão geométrica do cânion  $\frac{H}{W} = 0, 1$ , altura das construções de 2 metros e largura da rua de 20 metros. Também considera-se que o calor antrópico seja ativado ou desativado, impactando a distribuição espacial da temperatura do ar a 2 metros.

No mapa espacial da diferença de temperatura durante a noite (Figura 4.20(a)) é observado uma redução da ordem de 0.4-0.8°C às 23:00 UTC. Por outro lado, no que se refere à interação entre a configuração geométrica e o calor antrópico (Figura 4.20(b)) a diferença é da ordem de -1°C às 22:00 UTC. Isso evidencia que a configuração urbana mostrada no experimento libera energia acumulada durante o dia de forma eficiente, não sendo capaz de capturar e armazenar calor por muito tempo. No horário das 13:00 UTC Figura 4.20 (c) observa-se uma diferença negativa de temperatura, uma vez que durante o dia, as superfícies urbanas armazenam mais calor. Ao considerar o calor antrópico desativado (Figura 4.20 (c)) e ativado (Figura 4.20 (d)), nota-se uma diferença positiva cerca de 2 horas antes do valor máximo, com valores na parte central da mancha urbana de 1,5°C mais intenso que o Controle. As diferenças observadas são significativas ao NC de 96% nas mudanças feitas na razão geométrica  $(h_2)$  e 83% no experimento  $h_{12}$ .

A análise da contribuição do calor antrópico no experimento controle h1, geometria urbana no experimento de sensibilidade h2 e a interação entre a geometria e o calor antrópico no experimento de sensibilidade h12 para uma área urbana média é mostrada na Figura 4.21. O padrão diário da contribuição do calor antrópico (linha com círculos fechados) se mantém positivo durante todo o período e apresenta seu máximo de  $1.5^{\circ}$ C no período da manhã entre as 09:00 UTC e 12:00 UTC. A modificação feita na geometria (linha contínua) resulta um ciclo diurno com valores positivos entre as 11:00 UTC e 17:00 UTC, com um pico máximo de  $0.6^{\circ}$ C. Esse comportamento é similar a uma superfície homogênea tal que esse aumento de temperatura deve-se não pela geometria urbana mas sim em consequência da superfície impermeável que prontamente absorve calor. A interação entre os fatores (linha com x) é muito pequena e próxima de zero em todos os horários.

Figura 4.20 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle-MOR e o experimento de sensibilidade "análise", em que a razão geométrica foi alterada para 0,1 (h2) e o experimento h12 com opção de calor antrópico ativado. Os valores negativos na escala indicam aumento e positivos indicam redução da temperatura do ar a 2 metros às: a) 23:00 UTC; b) 22:00 UTC; c) 13:00 UTC e d) 11:00 UTC.



Figura 4.21 - Contribuição (diferença entre o Controle e o teste de sensibilidade, linha contínua) e interação (linha com x) entre o calor antrópico  $\hat{h_2}$  e a razão geométrica  $\hat{h_{12}}$  na temperatura do ar a 2 metros. No teste de sensibilidade, o calor antrópico foi ativado  $\hat{h_1}$  e a razão geométrica foi alterada para 0,2.



Uma característica que contribui para aquecimento das cidades é o desenvolvimento vertical urbano, os quais aprisionam calor (aumentando o saldo líquido de radiação) e diminuem as velocidade dos ventos (reduzindo o fluxo de calor sensível). Uma área com intenso desenvolvimento vertical urbano com razão geométrica do cânion  $\frac{H}{W} = 3$ , (altura do prédios 60 metros e largura das ruas 20 metros) é a segunda configuração realizada nos testes de sensibilidade do esquema urbano MORUSES. Na análise da Figura 4.22 nos testes  $i_2$  e  $i_{12}$  observa-se um aumento de temperatura na mancha urbana no período onde máximos de diferenças noturno são observados entre as 08:00 UTC e 09:00 UTC, uma diferença de temperatura de 1-2.5°C entre o experimento controle e os testes de sensibilidade. Isso indica que essa configuração armazena mais calor durante o dia e o libera a noite. No horário das 15:00 UTC e 16:00 UTC o comportamento oposto com um resfriamento de aproximadamente 2°C, possivelmente isso ocorre porque durante o dia existe o efeito de sombreamento dos prédios. Com a opção de calor antrópico ativada a diferença máxima na redução de temperatura é observada as 16:00 UTC e menos intenso entre 1 e 1.5°. Como descrito por Morais (2014) apesar da rua possuir um albedo relativamente menor, o efeito de reflexão múltipla da radiação de onda curta e onda longa são pouco efetivos, liberando mais calor para a atmosfera. Nesse caso o teste *t-student* indica confiança de 85% para  $i_2$  para as diferenças entre o experimento de sensibilidade e o Controle-MORUSES e para o nível de 80% o experimento  $i_{12}$  não apresentou diferenças significativas.

Na Figura 4.23 é mostrada a contribuição e a interação dos fatores razão geométrica e calor antrópico dos experimentos  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_{12}$ . Nas modificações feitas na razão geométrica ( $i_2$ ) observa-se um ciclo diurno, aquecimento no período das 21:00 UTC às 10:00 UTC porque há maior armazenamento de calor e redução na temperatura próximo às 12:00 UTC principalmente devido ao efeito de sombreamento dos prédios. A combinação entre a razão geométrica e o calor antrópico gerou pequenas diferenças, com valores negativos das 00:00 UTC às 15:00 UTC.

Figura 4.22 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle-MOR e o experimento de sensibilidade "Construções", em que a razão geométrica foi alterada para 3 (i2) e o experimento i12 com opção de calor antrópico ativado. Os valores negativos na escala indicam aumento e positivos indicam redução da temperatura do ar a 2 metros às a) 08:00 UTC; b) 09:00 UTC; c) 15:00 UTC e d) 16:00 UTC.



Figura 4.23 - Contribuição (diferença entre o Controle e o teste de sensibilidade, linha contínua) e interação (linha com x) entre o calor antrópico  $\hat{i_2}$  e a razão geométrica  $\hat{i_{12}}$  na temperatura do ar a 2 metros. No teste de sensibilidade, o calor antrópico foi ativado  $\hat{i_1}$  e a razão geométrica foi alterada para 3.



Figura 4.24 - Campo espacial das diferenças entre a simulação de temperatura do ar a 2 metros dos experimentos Controle-MOR e o experimento de sensibilidade "Edifícios Altos", em que a razão geométrica foi alterada para 5 (j2) e o experimento j12 com opção de calor antrópico ativado. Os valores negativos na escala indicam aumento e valores positivos indicam redução na temperatura do a 2 metros às: a) 08:00 UTC; b) 09:00 UTC; c) 16:00 UTC e d) 16:00 UTC.



A análise da contribuição dos fatores da razão geométrica do cânion  $\frac{H}{W} = 5$ , experimento de sensibilidade  $j_2$  e sua interação com o calor antrópico j12 é mostrada na Figura 4.25. A linha com círculos fechados corresponde a descrita no experimento de sensibilidade  $h_1$  e  $i_1$ , e a modificação feita na razão geométrica (linha contínua) apresenta um comportamento idêntico ao observado na Figura 4.23, porém cerca de 1°C mais intensa. Esse resultado também é mostrado no mapa espacial da diferença de temperatura. A combinação entre a razão geométrica e o calor antrópico

indicou um comportamento similar em que a interação entre os dois fatores analisados foi praticamente nula a partir das 15:00 UTC, e negativa das 00:00 UTC às 17:00 UTC porém no experimento de sensibilidade  $j_{12}$  apresentou um pico de 1°C entre as 09:00 UTC e 12:00 UTC.

Figura 4.25 - Contribuição (diferença entre o Controle e o teste) e interação entre fatores na temperatura do ar a 2 metros, no experimento de sensibilidade onde o calor antrópico foi ativado  $\hat{j_1}$ , razão geométrica foi alterada para 5 (linha contínua), interação entre o calor antrópico  $j_2$  e a razão geométrica  $\hat{j_{12}}$  (linha com x).



### 4.2.3 Síntese dos testes de sensibilidade

Os testes de sensibilidade nas propriedade dos materiais, indicaram que o aumento da temperatura do ar na superfície urbana é causado por interações complexas entre muitos fatores, incluindo a diminuição do albedo urbano, o aumento da massa térmica por unidade de área e a geometria urbana. A configuração de cânions evidenciam que na cidade há um maior armazenamento de energia. Nesse contexto são nos cânions que se processam os principais mecanismos de modificação da temperatura, quanto as diferentes orientações solares, características aerodinâmicas (rugosidade) e maior área de exposição às radiações de onda curta e longa. A superfície tridimensional das cidades restringe a emissão de onda longa de dentro dos cânions para a atmosfera, devido ao fator de visão do céu ser reduzido. Isso faz com que essa energia seja reabsorvida e reemitida várias vezes.

Na análise da influência dos fatores e suas interações, destaca-se que a diferença entre as simulações pode apresentar conclusões equivocadas sobre a influência de fatores na temperatura do ar a 2 metros. A metodologia de cálculo descrita pelo método de separação de fatores é uma ferramenta que auxilia a quantificar as contribuições de diferentes fatores e suas interações na temperatura do ar a 2 metros. De forma geral, no esquema 2T o parâmetro que tem maior influência é a capacidade térmica, seguido do albedo e por fim a emissividade. Por meio dos testes de sensibilidade no MORUSES, foi observado que o efeito vertical da geometria (razão geométrica alta) é uma possível causa do aquecimento noturno, devido ao maior armazenamento de calor pelo dossel urbano que não foi observado no experimento com a razão geométrica baixa, o qual evidenciou uma perda radiativa rápida no período noturno. O calor antrópico ativado está associado ao aumento da temperatura do ar. Nos testes de sensibilidade observa-se a importante influência na mancha urbana. A liberação do fluxo de calor antrópico é importante, principalmente no período noturno, em algumas cidades ou configurações urbanas, onde ele pode ser igual ou superior ao saldo de radiação.

### 4.3 Influência dos fatores na ICU

A análise da variação diurna do Delta ( $\Delta$ ) foi realizada apenas para um período que se refere ao primeiro dia do segundo caso de estudo, dia 29 de setembro de 2011, em virtude desse período ter registrado uma ICU intensa, céu claro e com picos maiores temperatura do ar a 2 metros entre 12:00 HL às 16:00 HL.

Na Figura 4.26 é apresentada a variação diurna do  $\Delta$  alterando a capacidade térmica por um fator de 10. O efeito da intensidade da ICU no telhado sofre uma mudança de sinal (negativo para positivo próximo das 08:00 HL até 12:00 HL), indicando uma redução na IICU ao meio dia. No período noturno é observado um comportamento oposto. O aumento da capacidade térmica no cânion tem um  $\Delta$  negativo de aproximadamente de 5°C entre as 06:00 HL e 12:00 HL, que indica um forte aumento na ICU. Após 12:00 HL, o  $\Delta$  tem um aumento e passa a ter uma contribuição positiva na ICU.

Figura 4.26 - Variação diurna do Delta do experimento de sensibilidade, onde a capacidade térmica foi aumentada por um fator de 10 em relação ao controle. A linha contínua indica as mudanças feitas no telhado e a linha pontilhada a mudança feita no cânion. Em Hora Local (HL).



Como pode ser visto na Figura 4.27, as modificações feitas no telhado apresentam um comportamento praticamente constante em todo o tempo, indicando que o efeito da emissividade está ausente no telhado. Em contrapartida, no cânion ocorre uma variabilidade diurna do  $\Delta$  entre as 03:00 HL e 17:00 HL, com valores negativos, indicando um efeito positivo na ICU, com seu pico máximo às 12:00 HL, horário de máxima de radiação solar. As construções e pavimentos que formam os cânions tendem a refletir radiação de forma difusa dificultando o arrefecimento.

Figura 4.27 - Variação diurna do  $\Delta$  do experimento de sensibilidade, onde a emissividade foi alterada para 1. A linha contínua indica as mudanças feitas no telhado e a linha pontilhada a mudança feita no cânion. Em hora Local.



O resultado do  $\Delta$  (Figura 4.28) com as modificações do albedo segue o comportamento descrito pelas modificações no experimento da emissividade (Figura 4.27). Verifica-se ausência de contribuição no telhado ao longo de todo o período e uma variabilidade diurna no cânion, sugerindo que assumindo um valor médio para área urbana no cânion aumenta-se o efeito diurno da ICU. Destaca-se que os cânions são responsáveis por múltiplas reflexões de radiação de onda longa, assim uma quantidade expressiva de radiação é capturada pelas paredes dos edifícios. No caso do telhado, a radiação escapa para atmosfera facilmente.

Figura 4.28 - Variação diurna do  $\Delta$  do experimento de sensibilidade, onde o albedo foi modificado por um valor moderado para a área urbana. A linha contínua indica as mudanças feitas no telhado e a linha pontilhada a mudança feita no cânion. Em hora local.



Na Figura 4.29, o  $\Delta$  para a configuração na paisagem aberta é negativo em todo o ciclo diurno, indicando um aumento na ICU, com maiores valores na parte da manhã e menores no período noturno. Essa configuração não permite um armazenamento de calor por muito tempo. Nas simulações com a razão geométrica maior que 1, o comportamento diurno na ICU é similar, como mostrado nas Figuras 4.30 e 4.31. Porém, a única configuração que apresentou diminuição no efeito da ICU pode ser observado na Figura 4.31, entre as 11:00 HL e 15:00 HL. A combinação de calor antrópico e dos fatores nas três diferentes configurações urbanas, linhas pontilhadas nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31 não modificou o comportamento do  $\Delta$ , apenas intensificou o efeito da ICU ao longo de todo o período, em todos os casos  $(h_{12}, i_{12} e j_{12})$ .

Figura 4.29 - Variação diurna do  $\Delta$  para  $\frac{H}{W} = 0.1$ , construções baixas na paisagem aberta, linha contínua indica a opção de calor antrópico desligada e pontilhada indica o calor antrópico ligado. Em hora local.



Figura 4.30 - Variação diurna do  $\Delta$  para  $\frac{H}{W} = 3$ , corresponde à uma área com intenso desenvolvimento urbano, linha contínua indica a opção de calor antrópico desligada e pontilhada indica o calor antrópico ligado. Em hora local.



Figura 4.31 - Variação diurna do  $\Delta$  para  $\frac{H}{W} = 5$ , corresponde à um extremo desenvolvimento vertical, linha contínua indica a opção de calor antrópico desligada e pontilhada indica o calor antrópico ligado. Em hora local.



### 4.4 BES Urbana

Para avaliar o BES urbana, foram analisadas as componentes do balanço descritas na Equação 3.4, médias dos dias 26 e 30 de setembro de 2011, separadas por *tiles*, para as simulações Controle utilizando os esquema urbano 2T e MORUSES, com e sem a fonte de calor antrópica ativada para a Estação de São Caetano do Sul (estação de referência urbana). Quando ativado o termo de calor antrópico  $Q_F$ , seu valor médio é adicionado ao fluxo de calor sensível.

Os valores simulados do calor antrópico para ambos os esquemas são idênticos, cerca  $19Wm^2$ , variando muito pouco durante o dia e também à noite . Esse valor é similar àqueles observados por (FERREIRA, 2010), que determinou a variação diurna e sazonal dos principais componentes do BES da cidade de São Paulo. Os dados utilizados em seu estudo foram coletados durante o ano de 2004 na estação climatológica da Universidade de São Paulo. FERREIRA (2010) obteve três máximos relativos, sendo os maiores ocorrendo no início da manhã (19,1 $Wm^{-2}$ ), próximo ao meio dia com (18,6 $Wm^{-2}$ ) e no final da tarde (19,3 $Wm^{-2}$ ).

Segundo Grimmond et al. (2004), a evolução diurna das variáveis do balanço de energia na área urbana apresenta uma defasagem entre os ciclos diurnos do saldo de

radiação Rn, calor armazenado no dossel urbano  $\Delta Qs$  e calor sensível H. Espera-se que o máximo de calor armazenado no dossel ocorra antes do máximo do ciclo diurno da radiação líquida. Oke et al. (1999) observaram o mesmo padrão em oito cidades urbanas de diferentes regiões do globo (Chicago, Los Angeles, Miami, Sacramento e Tucson nos Estados Unidos da América; Cidade do México, no México, Distrito Federal no Brasil e Vancouver, Canadá).

No esquema urbano 2T (Figura 4.32), observa-se que a defasagem do calor sensível H é suave e o armazenamento no dossel apresenta seu pico máximo às 11 HL, antes do máximo do pico do saldo radiação. Em média, o período é caracterizado por altos valores do saldo de radiação, com máximos às 12:00 HL, e o fluxo de calor sensível durante o dia apresenta valores positivos. Como a disponibilidade de umidade é uma das principais variáveis que controlam a partição do balanço de energia em regiões urbanas, a falta de vegetação e a utilização difundida de superfícies impermeáveis reduz a evaporação de modo que a partição de energia é dada pelo fluxo de calor sensível e o armazenamento de calor no dossel. Esta energia é liberada durante a noite, o que mantém as superfícies aquecidas durante o período noturno. Quando o termo de calor antrópico é ativado (Figura 4.32b), ele é somado ao termo de calor sensível, não modificando a partição de energia disponível entre as outras variáveis, como pode ser observado na Figura 4.32a.





O atraso esperado entre os ciclos diurnos do Rn,  $\Delta Qs \in H$  é muito mais acentuado quando se utiliza o esquema urbano MORUSES (Figura 4.33), tanto desconsiderando  $Q_F$  (Figura 4.33a) quanto levando em consideração sua adição (Figura 4.33b). Esse padrão do BES é descrito por Grimmond et al. (2004) para a cidade de Marseille na França. A dependência da geometria contida no esquema MORUSES evidencia uma característica importante quanto à evolução diurna das componentes do balanço de energia.

De forma similar ao esquema 2T, a ativação de  $Q_F$  (Figura 4.33b) não modifica a partição de energia disponível entre as outras variáveis.

O maior detalhamento do BES pelo esquema urbano MORUSES é responsável pelos resultados satisfatórios na simulação da temperatura do ar a 2 metros descritos na Seção 4.1, e consequentemente na simulação da ICU.

Figura 4.33 - Ciclo diurno médio das variáveis do fluxo de energia no período de 26 a 30 de setembro de 2011,  $Q_*$ ,  $Q_H$ ,  $Q_{LE}$  e  $\Delta Qs$  para a simulação controle utilizando o esquema urbano MORUSES, com a opção de calor antrópico desativada a) e ativada b).



### 4.5 Análise do Experimento Operacional

A comparação entre as simulações de temperatura do ar a 2 metros do BRAMS Controle e OPER para as estações São Caetano do Sul, Parelheiros, Pinheiros e Taboão da Serra são mostrada nas Figuras 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37, respectivamente, para os dias 26 a 30 de setembro de 2011.

Em geral, as configurações com o esquema 2T superestimaram os máximos e su-

bestimaram os mínimos no ciclo diurno da temperatura do ar a 2 metros. Porém, a OPER-2T (linha azul) apresenta maior superestimativa se comparada à simulação Controle-2T (linha laranja). A simulação da temperatura do ar a 2 metros utilizando a OPER-MOR é similar àquela utilizando a Controle-MOR. De forma similar descrita na Seção 4.1, não foram observadas diferenças consideráveis entre os esquemas urbanos e entre as configurações Controle e OPER para a estação de Parelheiros.

Na Tabela 4.2 é mostrado o Viés, o RMSE e o coeficiente de correlação entre as temperaturas previstas e observadas, considerando todos os dados horários do período de análise, para cada esquema utilizado. Pela análise do Viés, de maneira geral, a simulação Controle subestima a temperatura do ar a 2 metros em todas as estações analisadas. Porém, quando compara-se os esquemas urbanos, nota-se que a simulação com o MORUSES apresenta menores valores de Viés e RMSE do que o esquema 2T. O coeficiente de correlação entre as simulações e o observado é da ordem de 0,9 para ambos os esquemas. Na análise por estação, observa-se que as simulações Controle e OPER com os esquemas MORUSES apresentaram os maiores valores de correlação (superior a 0,96).

Figura 4.34 - Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de São Caetano, no período de 26 a 30 de setembro de 2011.



Figura 4.35 - Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de Parelheiros, no período de 26 a 30 de setembro de 2011.



Figura 4.36 - Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de Pinheiros, no período de 26 a 30 de setembro de 2011.



Figura 4.37 - Comparação entre a série temporal da temperatura do ar a 2 metros observada e simuladas pelo Controle e OPER utilizando os esquemas urbanos 2T e MORUSES para a estação de Taboão da Serra, no período de 26 a 30 de setembro de 2011.



Tabela 4.2 - Testes estatísticos aplicados na simulação em cada estação meteorológica.

| Simulação EXP–controle $\rightarrow$ | Esquema Urbano | Viés     | RMSE     | R         |
|--------------------------------------|----------------|----------|----------|-----------|
| Estações meteorológicas $\downarrow$ |                |          |          |           |
| S. Caetano                           | 2T             | 0,77     | 3,00     | 0,937     |
|                                      | MORUSES        | -0,44    | 2,81     | 0,964     |
| Parelheiros                          | $2\mathrm{T}$  | -2,08    | $3,\!63$ | 0,913     |
|                                      | MORUSES        | -1,90    | $3,\!64$ | 0,914     |
| Pinheiros                            | $2\mathrm{T}$  | 0,06     | $3,\!67$ | $0,\!938$ |
|                                      | MORUSES        | $1,\!60$ | 3,44     | 0,962     |
| Taboão da Serra                      | $2\mathrm{T}$  | -1,10    | $3,\!38$ | 0,943     |
|                                      | MORUSES        | 0,04     | $2,\!90$ | 0,962     |
| Simulação OPER $\rightarrow$         | Esquema Urbano | Viés     | RMSE     | R         |
| Estações meteorológicas $\downarrow$ |                |          |          |           |
| S. Caetano                           | 2T             | -1,31    | 3,36     | 0,929     |
|                                      | MORUSES        | -0,23    | $3,\!31$ | 0,962     |
| Parelheiros                          | $2\mathrm{T}$  | -2,58    | 4,09     | 0,913     |
|                                      | MORUSES        | -2,44    | 4,09     | 0,911     |
| Pinheiros                            | $2\mathrm{T}$  | -0,59    | $3,\!65$ | 0,925     |
|                                      | MORUSES        | 0,74     | $2,\!47$ | 0,964     |
| Taboão da Serra                      | $2\mathrm{T}$  | -1,48    | $3,\!60$ | 0,929     |
|                                      | MORUSES        | -0,52    | 3,44     | 0,962     |

A comparação entre a observação e a simulação da variação diurna da ICU utilizando as configurações Controle e OPER para ambos os esquemas urbanos é mostrada na Figura 4.38.

A Figura 4.38(b) representa o ciclo diurno médio da intensidade da ilha de calor no período total, simulados e observados.

Com o esquema urbano 2T, tanto a simulação Controle quanto a OPER superestimaram a intensidade da ICU de forma acentuada durante os máximos de intensidade. Este padrão também é similar ao encontrado por Silva (2016). As simulações realizadas com as configurações Controle e OPER representam de forma similar a intensidade Ilha de Calor, porém a simulação OPER-2T em todo o período superestima os máximos da IICU se comparada à Controle-2T. A simulação com o esquema MORUSES apresenta pouca diferença entre as configurações.

Figura 4.38 - Comparação entre a simulação e a observação da lha de Calor a) Durante o período de análise 26 de setembro de 2011 a 30 de setembro de 2011 b) Ciclo diurno médio da IICU c) 26 a 27 de setembro d) 29 a 30 de setembro.



# 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho propôs avaliar diferentes propriedades da superfície urbana que exercem influência na simulação da temperatura do ar a 2 metros e consequentemente na Intensidade da ICU (IICU) na RMSP. Tais propriedades foram analisadas pela realização de testes de sensibilidade nas parametrizações urbanas 2T e MORUSES do modelo BRAMS, visando a descrição dos processos físicos associados à IICU sobre a RMSP.

Para os testes de sensibilidade foram modificados três principais fatores que tem influência nas propriedades dos materiais para o esquema 2T e para o esquema MORUSES a geometria urbana e o calor antrópico .

O experimento controle, com as duas parametrizações e a configuração operacional do CPTEC específica para a área urbana da Região Metropolitana do Rio de Janeiro representou de forma satisfatória, na maior parte do período de análise, o ciclo diurno da temperatura do ar a 2 metros. Porém, o esquema MORUSES, com a sua configuração dependente da geometria urbana, apresentou resultados mais realistas, e portanto, é mais apropriado para representar a área urbana da RMSP.

Na análise da influência dos fatores e suas interações, destaca-se que a análise da diferença entre as simulações pode apresentar conclusões equivocadas sobre a influência de fatores na temperatura do ar a 2 metros. Para evitar interpretações errôneas utilizou-se a metodologia de separação de fatores, que possibilita quantificar as contribuição de diferentes características e suas interações.

De forma geral, no esquema 2T o parâmetro que tem maior influência é a capacidade térmica do material, seguido do albedo e por fim da emissividade.

Por meio dos testes de sensibilidade no MORUSES, foi observado que o efeito vertical da geometria urbana (razão geométrica alta) é uma das causa do aquecimento noturno. Isso ocorre devido ao maior armazenamento de calor pelo dossel urbano, que não foi observado no experimento com a razão geométrica baixa, evidenciando a perda radiativa rápida no período noturno. O calor antrópico ativado no esquema urbano intensifica o sinal da contribuição tanto positivamente no período diurno e negativamente no período noturno.

Com base nos resultados obtidos nos testes de sensibilidade e analisando-se a influência dos fatores na ICU na RMSP, conclui-se que: - O aumento na capacidade térmica no telhado diminui a temperatura máxima do ar ao meio dia e aumenta a temperatura do ar no período noturno. No cânion ocorre um efeito positivo na ICU na parte da manhã e oposto no período noturno;

- A emissividade e o albedo no telhado têm um efeito mínimo sobre a intensidade da ICU, enquanto que no cânion o albedo e a emissividade apresentam uma variabilidade diurna com um efeito positivo na ICU.

- O efeito na ICU com uma razão geométrica baixa ocasiona um aumento na temperatura do ar na área urbana, indicando um efeito positivo na intensidade da ICU. Nos experimentos com a razão geométrica maior que 1, o efeito é positivo na ICU.

Na análise do balanço de energia na superfície, o comportamento médio dos fluxos foi típico de uma área urbana, incluindo o armazenamento de calor no dossel e o valor positivo do fluxo de calor sensível.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com a realização deste estudo foi possível compreender o desempenho dos dois esquemas urbanos sobre a RMSP. A geometria urbana e as propriedade dos materiais impõem uma série de mudanças no BES, cada uma com seu próprio impacto sobre a temperatura do ar próxima a superfície. Esses impactos que explicam as diferenças urbanos-rurais na temperatura próxima a superfície. Contudo é necessário uma maior investigação em vários outros tópicos, alguns são descritos abaixo:

- Estudos numéricos de sensibilidade para áreas urbanas com razão geométrica observada baixa, para verificar habilidade com esquema 2T;
- Estudar a influência de fenômenos de grande escala e escala local na intensidade da ICU na RMSP utilizando os diferentes esquemas de parametrização urbana do BRAMS;
- Realizar simulações com o mapa de uso do solo com distintos tipos de classificação urbana como central, comercial, residencial suburbana;
- Realizar simulações com a inclusão dos efeitos da vegetação urbana e verificar impacto na magnitude e variabilidade temporal do fluxo de calor latente.
- Realizar testes de sensibilidade avaliando o albedo das paredes e ruas no esquema MORUSES.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALONSO, M. F. Previsão de tempo químico para a América do Sul:impacto das emissões urbanas nas escalas local e regional. 216 p. PhD Thesis (PhD) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011-06-30 2011. Available from:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18/2011/06.06.15.12.09>. Access in: 16 maio 2016. 1

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International** Journal of Climatology, v. 23, n. 1, p. 1–26, 2003. ISSN 08998418. 1, 3

BEST, M.; PRYOR, M.; CLARK, D.; ROONEY, G.; ESSERY, R.; MENARD, C.; EDWARDS, J.; HENDRY, M.; PORSON, a.; GEDNEY, N.; MERCADO, L.; SITCH, S.; BLYTH, E.; BOUCHER, O.; COX, P.; GRIMMOND, C.; HARDING, R. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description. Part 1: Energy and water fluxes. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 677–699, 2011. ISSN 1991-9603. Available from: <http://nora.nerc.ac.uk/15031/>. 21

BEST, M. J. Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. **Boundary Layer Meteorology**, v. 114, p. 91–109, 2005. ISSN 0006-8314. 3, 4, 10, 11, 22

BEST, M. J.; GRIMMOND, C. S. B. Importance of initial state and atmospheric conditions for urban land surface models' performance. **Urban Climate**, Elsevier B.V., v. 10, n. P2, p. 387–406, 2014. ISSN 22120955. Available from: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.006">http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.006</a>>. 1, 2, 3

BEST, M. J.; GRIMMOND, C. S. B.; VILLANI, M. G. Evaluation of the urban tile in MOSES using surface energy balance observations. **Boundary-Layer** Meteorology, v. 118, n. 3, p. 503–525, 2006. ISSN 00068314. 3, 10, 11, 22

BORNSTEIN, R.; LIN, Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. Atmospheric Environment, v. 34, n. 3, p. 507–516, 2000. ISSN 13522310. 1

CAMILLONI, I.; BARRUCAND, M. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 47–58, 2012. ISSN 0177798X. 30 CHAXEL, E.; CHOLLET, J. P. Ozone production from Grenoble city during the August 2003 heat wave. **Atmospheric Environment**, Elsevier Ltd, v. 43, n. 31, p. 4784–4792, 2009. ISSN 13522310. Available from: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.054">http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.054</a>>. 1

CLARK, D. B.; MERCADO, L. M.; SITCH, S.; JONES, C. D.; GEDNEY, N.; BEST, M. J.; PRYOR, M.; ROONEY, G. G.; ESSERY, R. L. H.; BLYTH, E.; BOUCHER, O.; HARDING, R. J.; HUNTINGFORD, C.; COX, P. M. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 701–722, sep 2011. ISSN 1991-9603. Available from: <http://nora.nerc.ac.uk/15031/http: //www.geosci-model-dev.net/4/701/2011/>. 21

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; BERG, L. van de; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; H??LM, E. V.; ISAKSEN, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P. de; TAVOLATO, C.; TH??PAUT, J. N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011. ISSN 00359009. 18

FERREIRA, M. J. Balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo. xxiii + 183. p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Available from: <http:</p>

//www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d\_mauricio\_j\_ferreira.pdf>.
70

FRASSONI, A.; FREITAS, S. R.; EIRAS, D.; CHOVERT, A. D.; ALONSO, M.; LONGO, K. M.; OLIVEIRA, V.; BATISTA, F.; MOREIRA, D. S.; FRANÇA, D.; FERRADA, G.; COELHO, L. B.; PERES, L. F.; HENKES, A.; WEBER, M. E.; MADELEINE, S. IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PREVISÃO DE QUALIDADE DO AR EM ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO ESPACIAL PARA A REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO VOLTADO PARA OS JOGOS OLÍMPICOS E PARALÍMPICOS 2016. n. Ic, 2016. 20
FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; Silva Dias, P. L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of S??o Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43–65, 2007. ISSN 00068314. 2

FREITAS, E. D. de; DIAS, P. L. d. S. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 355–366, 2005. 2, 12, 13

FREITAS, S. Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases traços e de aerossóis de queimadas no cerrado e floresta tropical. PhD Thesis (Tese de Doutorado) — Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 17

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; Silva Dias, M. a. F.; CHATFIELD, R.; Silva Dias, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, a.; PANETTA, J. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 8, p. 2843–2861, 2009. ISSN 16807324. 17, 18

FREITAS, S. R.; PANETTA, J.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F.;
MOREIRA, D. S.; ROSÁRIO, N. E.; Silva Dias, P. L.; Silva Dias, M. A. F.;
SOUZA, E. P.; FREITAS, E. D.; LONGO, M.; FRASSONI, A.; FAZENDA, A. L.;
Santos e Silva, C. M.; PAVANI, C. A. B.; EIRAS, D.; FRANÇA, D. A.;
MASSARU, D.; SILVA, F. B.; CAVALCANTE, F.; PEREIRA, G.;
CAMPONOGARA, G.; FERRADA, G. A.; Campos Velho, H. F.; 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. June, p. 1–55, 2017. ISSN 1991-962X. Available from:

<http://www.geosci-model-dev-discuss.net/gmd-2016-130/>. 17, 18, 21

GEVAERD, R.; FREITAS, S. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera Parte I: Descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 59–73, 2006. 17, 20

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. ISSN 16807324. 17, 20

GRIMMOND, C. S. B.; SALMOND, J. A.; OKE, T. R.; OFFERLE, B.; LEMONSU, A. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille : Heat , mass ( water and carbon dioxide ), and momentum. v. 109, n. December, p. 1–19, 2004. 70, 72

HAMDI, R.; SCHAYES, G. Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 7, p. 973–982, jun 2008. ISSN 08998418. Available from:

<http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/GLODAP/glodap{\_}pdfs/Thermohaline. web.pdfhttp://doi.wiley.com/10.1002/joc.1598>. 27, 31, 40, 44

HARMAN, I. A. N. N. Radiative Exchange in an Urban Street Canyon .pdf. Boundary-Layer Meteorology, v. 110, p. 301–316, 2004. 11, 24

HARMAN, I. N. The Energy Balance of Urban Areas. **THE UNIVERSITY OF READING Department ofMeteorology T**, n. October, p. 1–169, 2003. 7

HARMAN, I. N.; BARLOW, J. F.; BELCHER, S. E. Scalar fluxes from urban street canyons. Part II: Model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 113, n. 3, p. 387–409, 2004. ISSN 00068314. 11, 24

HARMAN, I. N.; BELCHER, S. E. The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 132, n. 621, p. 2749–2768, 2006. ISSN 00359009. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1256/qj.05.185>. 9, 10, 11

HOMANN, C. T. Avaliação dos efeitos urbanos sobre circulações de mesoescala em função da expansão territorial da Região Metropolitana de São Paulo. xxiii + 141. p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 14

IACONO, M. J.; DELAMERE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; COLLINS, W. D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 13, p. 2–9, 2008. ISSN 01480227. 20 KARAM, H. A.; FILHO, A. J. P.; MASSON, V.; NOILHAN, J.; FILHO, E. P. M. Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 109–120, 2010. ISSN 0177798X. 10

KUTTLER, W. Urban Ecology. 2008. 1, 7

LI, C.; ZHOU, J.; CAO, Y.; ZHONG, J.; LIU, Y.; KANG, C.; TAN, Y. Interaction between urban microclimate and electric air-conditioning energy consumption during high temperature season. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 117, p. 149–156, 2014. ISSN 03062619. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.057>. 1

LONGO, K. Estudos de partículas de aerossóis e gases traços na atmosfera da bacia Amazônica: influencias das circulações regionais e de larga escala. Tese de doutorado — Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 17

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; PIRRE, M.; MAR??CAL, V.; RODRIGUES, L. F.; PANETTA, J.; ALONSO, M. F.; ROS??RIO, 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. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 5, p. 1389–1405, 2013. ISSN 1991959X. 18

LUHAR, A. K.; THATCHER, M.; HURLEY, P. J. Evaluating a building-averaged urban surface scheme in an operational mesoscale model for flow and dispersion. Atmospheric Environment, Elsevier Ltd, v. 88, p. 47–58, 2014. ISSN 13522310. Available from: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.059">http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.059</a>>.

MARCIOTTO, E. R. Estudo da Influência de um Dossel Urbano sobre o Balanço de Energia na Superfície e Implicacões na Estrutura Vertical da Camada Limite Atmosférica. xxiii + 117p. p. (INPE-10394-TDI/920). Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 3, 13, 25

MARCIOTTO, E. R.; OLIVEIRA, A. P.; HANNA, S. R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2497–2505, 2010. ISSN 03601323. 29

MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M. W. Mesoscale Models. Boundary-Layer Meteorology, p. 261–304, 2002. 10, 44

MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, n. 3, p. 357–397, 2000. ISSN 00068314. 10, 11

\_\_\_\_\_. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. **Theoretical** and **Applied Climatology**, v. 84, n. 1-3, p. 35–45, 2006. ISSN 0177798X. 10

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. J. Atmos. Sci., v. 31, p. 1791–1806, 1974. 20

\_\_\_\_\_. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Reviews of Geophysics and Space Physics, v. 20, p. 851–875, 1982. 20

MORAIS, M. B. Efeitos da vegetação sobre os termos do balanço de energia em áreas urbanas. xxiii + 145. p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Available from: <http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/t\_marcos\_v\_b\_morais\_ corrigida.pdf>. 3, 12, 14, 25, 60

MOREIRA, D. S.; FREITAS, S. R.; BONATTI, J. P.; MERCADO, L. M.; ROSÁRIO, N. M.; LONGO, K. M.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; GATTI, L. V. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): Applications to numerical weather forecasting and the CO2 budget in South America. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 4, p. 1243–1259, 2013. ISSN 1991959X. 17, 18, 21, 22

OKE, T. R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment Pergamon Press, v. 7, p. 769-779, 1973. ISSN 00046981. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004698173901406>. 7

\_\_\_\_\_. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 3, p. 237–254, 1981. ISSN 1097-0088. 10, 28

\_\_\_\_\_. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982. ISSN 1477-870X. Available from: <a href="http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710845502">http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710845502</a>>. 7

\_\_\_\_\_. Boundary Layer Climates, Second Edition. 2. ed. Routledge, 1988. ISBN 0415043190,9780415043199. Available from: <http://gen.lib.rus.ec/ book/index.php?md5=2B3294056EF0C76BB36601877F696436>. 7, 8, 28, 46

OKE, T. R.; JA, E.; GRIMMOND, C. S. B. The energy balance of central Mexico City during the dry season. v. 33, p. 3919–3930, 1999. 71

OLSON, D. A.; JUNKER, N. W.; KORTY, B. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the nmc. **Wea. Forecasting**, v. 10, p. 498–511, 1995. 32

OLSON, J. Global ecosystem framework-definitions: Usgs eros data center internal report. p. 37, 1994. 17

PORSON, A.; CLARK, P. A.; HARMAN, I. N.; BEST, M. J.; BELCHER, S. E.
Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I:
Description and idealized simulations. Quarterly Journal of the Royal
Meteorological Society, v. 136, n. 651, p. 1514–1529, 2010. ISSN 00359009. 3, 10, 11, 22, 23, 24, 25

RADHI, H.; SHARPLES, S. Quantifying the domestic electricity consumption for air-conditioning due to urban heat islands in hot arid regions. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 112, p. 371–380, 2013. ISSN 03062619. Available from: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.013">http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.013</a>>. 1

ROSSATO, L.; ALVALá, R. S.; TOMASELLA, J. Climatologia da umidade do solo no brasil. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1910–1915. 17

ROULET, Y. A. Validation and application of an urban turbulence parameterisation scheme for mesoscale atmospheric models. xxiii + 224. p. PhD Thesis — Institut des sciences et technologies de l'environnement, Lausanne, 2004. xvii, 25, 27, 40, 41

RYU, Y. H.; BAIK, J. J.; KWAK, K. H.; KIM, S.; MOON, N. Impacts of urban land-surface forcing on ozone air quality in the Seoul metropolitan area. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 4, p. 2177–2194, 2013. ISSN 16807324. 1, 2

SARRAT, C.; LEMONSU, A.; MASSON, V.; GUEDALIA, D. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 10, p. 1743–1758, 2006. ISSN 13522310. 1

SESTINI, M.; REIMER, E.; VALERIANO, D.; ALVALá, R. S.; MELLO, E.; CHAN, C.; NOBRE, C. Mapa de cobertura da terra da amazônia legal para uso em modelo meteorológicos. In: **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 2901–2906. 17

SILVA, F. B. Análise dos efeitos combinados da Ilha de Calor Urbana e poluição do ar. xxiii + 269p. p. (INPE-10394-TDI/920). Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. 2, 3, 4, 12, 15, 18, 22, 25, 31, 35, 38, 76

SILVA, F. B.; LONGO, K. M.; ANDRADE, F. M. de. Spatial and temporal variability patterns of the urban heat island in são paulo. **Environments**, p. 26, 2017. 12

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. Statistical Methods, Eighth Edition. [S.l.]: Iowa State University Press, 1989. 33

STEIN, U.; ALPERT, P. Factor Separation in Numerical Simulations. 1993. 2107–2115 p. 27

STULL, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. 1. ed. Springer Netherlands, 1988. (Atmospheric Sciences Library 13). ISBN 978-90-277-2769-5,978-94-009-3027-8. Available from: <http://gen.lib.rus.ec/ book/index.php?md5=6F49ABE87827CBCF8A774E1FEFB677AE>. 7

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1997. ISSN 03787788. 2, 25, 46

TAHA, H. A. I. D. E. R.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. R. T. H. U. R.Residential Cooling Loads and the Urban Heat Island the Effects of Albedo. v. 23, n. 4, p. 271–283, 1988. 46

THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T. A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, n. 10, p. 3636–3658, 2014. ISSN 0022-4928. Available from: <a href="http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-13-0305.1">http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-13-0305.1</a>.

TRIPOLI, G.; COTTON, W. The colorado state university three-dimensional cloud/mesoscale model. part i: General theoretical framework and sensitivity experiments. J. de Rech. Atmos, v. 16, p. 185—-220, 1982. 17

WALKO, R. L.; BAND, L. E.; BARON, J.; KITTEL, T. G. F.; LAMMERS, R.; LEE, T. J.; OJIMA, D.; PIELKE, R. a.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C. J.; VIDALE, P. L. Coupled atmosphere, biophysics and hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, p. 931–944, 2000. ISSN 0894-8763. 17

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences. [S.l.]: Academic press, 2011. 33