

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE ESQUEMA DE
DOSSEL URBANO NO MODELO
METEOROLÓGICO WRF

Amanda Noronha Moreira de Carvalho

Belo Horizonte

2019

**AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE ESQUEMA DE
DOSSEL URBANO NO MODELO METEOROLÓGICO
WRF**

Amanda Noronha Moreira de Carvalho

Amanda Noronha Moreira de Carvalho

**AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE ESQUEMA DE
DOSSEL URBANO NO MODELO METEOROLÓGICO
WRF**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, Prevenção e Controle da Poluição

Orientador: Taciana Toledo de Almeida Albuquerque

Coorientador: Lizandro Gemiacki

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

C331a

Carvalho, Amanda Noronha Moreira de.
Avaliação e aplicação de esquema de dossel urbano no modelo meteorológico WRF [manuscrito] / Amanda Noronha Moreira de Carvalho. – 2019.
166 f., enc.: il.

Orientadora: Taciana Toledo de Almeida Albuquerque.
Coorientador: Lizandro Gemiacki.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 165-166.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Planejamento urbano - Fatores climáticos - Teses. 4. Clima - Belo Horizonte (MG) - Teses. I. Albuquerque, Taciana Toledo de Almeida. II. Gemiacki, Lizandro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte – BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação e Aplicação de Esquema de Dossel Urbano No Modelo Meteorológico Wrf

AMANDA NORONHA MOREIRA DE CARVALHO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Taciana Toledo de Almeida Albuquerque

Profa DRA TACIANA TOLEDO DE ALMEIDA ALBUQUERQUE

Edmilson Dias de Freitas

Prof. EDMILSON DIAS DE FREITAS

Eleonora Sad de Assis

Profa ELEONORA SAD DE ASSIS

Neyval Costa Reis Junior

Prof. NEYVAL COSTA REIS JUNIOR

Lizandro Gemacki

Prof. LIZANDRO GEMACKI

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Antonio Teixeira de Matos

Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador

Versão Final aprovada por

Taciana Toledo

Profª. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque
Orientadora

Belo Horizonte, 16 de abril de 2019.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Taciana Toledo, pela infalível disponibilidade, precisas colocações, incentivos, oportunidades e conversas. Sou muito grata pela experiência de ser sua orientanda. Eu, certamente, não poderia ter escolhido melhor.

Ao meu coorientador Lizando Gemiacki, coordenador do 5º DISME do INMET, pela presteza na disponibilização de dados, leituras cuidadosas e valiosas contribuições.

Aos companheiros de GPAMA (Grupo de Pesquisa em Poluição do Ar e Meteorologia Aplicada), pela alegria da convivência e pelo auxílio durante todo o período de realização deste trabalho, em ordem alfabética: Aline Nascimento, Erick Sperandio, Fábio Soares, Felipe Marinho, Janaína Antonino, Rizzieri Pedruzzi e Willian Lemker. Vocês são demais!

Ao Alberto Martilli, desenvolvedor do BEP, por realizar todas as alterações no código do WRF necessárias; ao Benjamin Bechtel, da iniciativa WUDAPT, pelo auxílio com a aplicação da metodologia da classificação LCZ; ao Oscar Brousse, da *University of Leuven*, pela ajuda com a implementação do arquivo de uso e ocupação do solo no modelo WRF (W2W); e à Xia Sun, da *University of Nevada*, por esclarecer algumas dúvidas conceituais.

À Dirce Maria, da Universidade de São Paulo, e ao Wesley Correa, da Universidade Federal do Espírito Santo, pela ajuda com algumas etapas desta pesquisa.

À FAPEMIG e à CAPES, pela concessão dos apoios financeiros.

Por fim, aos meus pais, Antônio Afonso e Nanci, e ao meu irmão, Alexandre, pelo apoio.

RESUMO

A substituição de cobertura vegetal por edifícios e superfícies impermeabilizadas, além do desenvolvimento de diversas atividades antrópicas poluidoras, são capazes de alterar drasticamente as propriedades da superfície e interferir nas condições meteorológicas locais. O modelo de mesoescala *Weather Research and Forecasting* (WRF) quando acoplado à modelos de dossel urbano, como o *Building Effect Parameterization* (BEP), simula de forma mais completa os processos que ocorrem na camada limite urbana, determinando a distribuição de calor, umidade e momentum, horizontal e verticalmente. Dado que a aglomeração em cidades é uma tendência mundial, faz-se necessário testar as ferramentas disponíveis para o estudo dos efeitos da ocupação urbana nos processos que ditam a formação das condições meteorológicas, das quais dependem inúmeros serviços essenciais. Assim, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito da acoplagem de esquema de dossel urbano do BEP no WRF, denominado de uWRF, e aplicá-lo ao estudo do clima urbano da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Inicialmente, as áreas urbanas foram classificadas em zonas climáticas locais e atualizadas no banco de dados do modelo acoplado. A partir da parametrização do modelo e sua validação com dados medidos, foi observado que uma má representação do solo interfere significativamente na capacidade de predição do uWRF, sendo este, no entanto, promissor na redução do usual viés positivo da velocidade do vento apresentado pela abordagem padrão (controle). Posteriormente, foram comparados os resultados de temperatura do ar a 2m e os fluxos de energia superficiais das duas versões. Foi verificado que a abordagem padrão suprime os fluxos de calor latente nas classes urbanas, estimando um maior armazenamento de calor durante o dia, o que faz com que as temperaturas noturnas sejam mais pronunciadas que aquelas calculadas pelo modelo acoplado em até 1,1°C. Também foi proposto um cenário de urbanização futuro em que se simulou o espalhamento, adensamento e verticalização da mancha urbana atual. Observou-se um aumento máximo na temperatura do ar de 3,2°C e a intensificação da ilha de calor, na região centro-sul da capital. Por fim, testou-se a sensibilidade do BEP com relação à dois parâmetros que caracterizam o dossel urbano. Apesar das modificações brandas nos valores destes, foram perceptíveis as alterações na temperatura do ar e do solo, indicando que o módulo é sensível aos parâmetros de entrada e, portanto, devem ser adotados com critério. Espera-se que as limitações e potencialidades do modelo, bem como outros resultados aqui descritos possam auxiliar na condução de análises ulteriores.

Palavras-Chave: modelagem meteorológica, clima urbano, WRF, BEP, RMBH.

ABSTRACT

Natural land cover substitution for buildings and impervious surfaces, besides the development of polluting human activities, are capable of drastically change the surface properties with a consequential interference on local meteorological conditions. *Weather Research and Forecasting* (WRF) mesoscale model when coupled with urban canopy schemes such as the *Building Effect Parameterization* (BEP), is able to simulate more realistically urban boundary layer processes, determining heat, moisture and momentum distribution, both horizontal and vertically. Given human agglomeration in urban areas is a worldwide tendency, it is imperative the need to test available tools to analyze the urban coverage influence on the processes that dictate the meteorological conditions formation, of which several essential services rely on. Thereby, this survey had as main objectives to evaluate the effect of BEP's urban canopy scheme coupling to WRF, denotated as uWRF, and its application in the study of the Metropolitan Area of Belo Horizonte's (MABH) urban climate, for which just a few numerical modeling studies have been observed. Initially, urban areas of interest were classified in local climatic zones and updated on uWRF database. After model parameterization and validation with measured data, it was observed that a poor land use and land cover representation negatively impacted on the uWRF predicted results, though it has proven its skillness on reducing the usual wind speed positive bias presented by the bulk approach (control). Subsequently, the 2m air temperature outputs and the surface energy fluxes of both model versions were analyzed. It was verified that WRF tends to suppress latent heat flux in the urban classes and to estimate higher ground heat fluxes during daytime, resulting in more pronounced nighttime temperatures, up to 1.1°C, than those calculate by the urban coupled model. It was also proposed a scenario of future growth, in which was simulated sprawling, densification and verticalization of the current urbanized area. It was observed an air temperature increase up to 3.2°C and the intensification of the urban heat island at the south-central region of Belo Horizonte. Finally, it was performed a sensitivity test on the urban module regarding two urban canopy parameters. Despite the mild alterations proposed, the changes in the air and skin temperature were perceptible, indicating that the module is sensitive to the input parameters which, therefore, must be adopted with discretion. It is expected that the limitations and potentialities of both model versions, besides the results herein depicted may contribute to the conduction of subsequent analyzes.

Keywords: meteorological modeling, urban climate, WRF, BEP, MABH.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1 INTERAÇÃO DA SUPERFÍCIE URBANA COM A ATMOSFERA.....	18
3.2 MODELO METEOROLÓGICO WRF.....	26
3.2.1 <i>Formulação geral do modelo</i>	26
3.2.2 <i>Alocação geográfica, condições iniciais e de contorno</i>	28
3.2.3 <i>Parametrizações físicas</i>	31
3.2.4 <i>Fluxo de processamento</i>	34
3.3 REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE TERRESTRE.....	36
3.3.1 <i>Abordagem padrão</i>	36
3.3.2 <i>Building Effect Parameterization - BEP</i>	38
3.4 DADOS DE ENTRADA PARA INICIALIZAÇÃO DO BEP E A CLASSIFICAÇÃO LCZ.....	43
3.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
3.5.1 <i>Aspectos gerais da RMBH</i>	47
3.5.2 <i>Características climáticas</i>	49
3.5.3 <i>Topografia</i>	50
3.6 ESTUDOS DESENVOLVIDOS NA RMBH NO ÂMBITO DO CLIMA URBANO	52
4 METODOLOGIA.....	56
4.1 DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE ESTUDO.....	56
4.2 CLASSIFICAÇÃO LCZ.....	59
4.2.1 <i>Metodologia WUDAPT</i>	59
4.3 MODELAGEM METEOROLÓGICA	66
4.3.1 <i>Configurações do modelo WRF</i>	66
4.3.2 <i>Parametrização do WRF padrão e urbano</i>	74
4.3.3 <i>Avaliação do desempenho das modelagens padrão e urbana</i>	76
4.4 ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS MODELADOS PELO WRF PADRÃO E URBANO	83
4.4.1 <i>Modelagem meteorológica padrão para temperatura do ar e vento próximos à superfície</i>	83
4.4.2 <i>Análise horizontal do efeito da ativação do módulo urbano na temperatura próxima à superfície e fluxos de energia superficiais</i>	83
4.5 AVALIAÇÃO DA MUDANÇA NAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS LOCAIS DA RMBH A PARTIR DE CENÁRIO DE EXPANSÃO DA MANCHA URBANA.....	84
4.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO BEP	86
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
5.1 CLASSIFICAÇÃO LCZ.....	87
5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO WRF.....	89
5.2.1 <i>Temperatura do ar a 2 m</i>	92
5.2.2 <i>Umidade específica do ar a 2 m</i>	97
5.2.3 <i>Vento a 10 m</i>	100
5.3 ANÁLISE DETALHADA DAS DIFERENÇAS ENTRE OS DADOS METEOROLÓGICOS MODELADOS PELO WRF PADRÃO E URBANO	109
5.3.1 <i>Modelagem meteorológica padrão para temperatura e vento próximos à superfície</i>	109
5.3.2 <i>Análise horizontal do efeito da ativação do módulo urbano na temperatura próxima à superfície e fluxos de energia superficiais</i>	112

5.4	AVALIAÇÃO DA MUDANÇA NAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS LOCAIS DA RMBH A PARTIR DE CENÁRIO DE EXPANSÃO DA MANCHA URBANA.....	131
5.4.1	<i>Análise da diferença da temperatura do ar próximo à superfície</i>	131
5.4.2	<i>Análise de corte transversal em região de expressiva ocupação</i>	135
5.5	TESTE DE SENSIBILIDADE DO BEP	141
5.5.1	<i>Aumento da razão H/W</i>	141
5.5.2	<i>Aumento da fração urbana</i>	144
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	147
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
	REFERÊNCIAS	150
	APÊNDICE	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da camada limite urbana e das subcamadas geradas em diferentes escalas - (a) mesoescala, (b) escala local e (c) microescala.	19
Figura 2: Representação dos fluxos envolvidos no balanço energético da superfície para um volume de edificação-solo-ar durante o período diurno em uma área urbana, no qual as setas dirigidas para cima indicam perda de energia e as dirigidas para baixo indicam ganho de energia.	21
Figura 3: Fator de visão do céu para (a) um ponto na Praça da Liberdade (região centro-sul) e para (b)(c) dois pontos distintos na Praça Sete de Setembro (área central) de Belo Horizonte/MG.....	23
Figura 4: Sistema de coordenadas verticais η do modelo WRF.....	27
Figura 5: Grade horizontal (à esq.) e vertical (à dir.) de Arakawa tipo C.	28
Figura 6: Fontes das condições de contorno lateral dos domínios definidos no modelo meteorológico WRF.	30
Figura 7: Domínios aninhados bidirecionalmente (<i>two-way nesting</i>).	31
Figura 8: Interação entre as parametrizações físicas do modelo WRF.....	34
Figura 9: Fluxo de trabalho do modelo WRF.....	35
Figura 10: Representação dos processos físicos considerados pelo <i>Single-layer Urban Canopy Model</i> (SLUCM).	38
Figura 11: Representação dos processos físicos considerados pelo <i>Building Effect Parameterization</i> (BEP).	39
Figura 12: Representação do cânion urbano no modelo urbano do BEP.	40
Figura 13: Descrição das classes das zonas climáticas locais.	45
Figura 14: Municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte.	47
Figura 15: Normais climatológicas (1981 - 2010) de temperatura média compensada (°C) e precipitação acumulada mensal (mm) para a RMBH.....	50
Figura 16: Mapa hipsométrico da RMBH.	51
Figura 17: Dados de umidade relativa mínima média e amplitude térmica média para o período com o maior número de dias sem precipitação.	58
Figura 18: Cartas sinóticas dos dias 05 e 07 de setembro de 2017, para o horário local de 09h.	58
Figura 19: Duas cenas da banda 4 do Landsat8 cobrindo a RMBH sobrepostas (a)(b) e o mosaico de ambas. (c).	61
Figura 20: Composição natural do Landsat8 com a mancha urbana ao centro, delimitados pelo ROI de 130 km x 130 km de extensão.....	62
Figura 21: Exemplos de classes urbanas da LCZ na RMBH: a) LCZ 1 no bairro Santo Agostinho/BH, b) LCZ 2 no bairro Gutierrez/BH, c) LCZ 3 na região de Venda Nova/BH, d) LCZ 6 no bairro Suzana/Florestal, e) LCZ 8 no bairro Cidade Industrial I/Contagem, f) LCZ 9 na cidade de Esmeraldas.....	63
Figura 22: Exemplos de classes naturais da LCZ na RMBH: a) LCZ A no Reservatório Serra Azul/Igarapé, b) LCZ B próxima ao distrito de São Sebastião das Águas Claras/ Nova Lima, c) LCZ C próxima à cidade de Dr. Campolina, d) LCZ D próxima à cidade de Fidalgo, e) LCZ E próxima à cidade de Cardeal Mota, f) LCZ F próxima à cidade de Itatiaçu, g) LCZ G próxima à cidade de Ribeiros.	64
Figura 23: : Classificação LCZ da Região Metropolitana de Belo Horizonte.....	65
Figura 24: Aninhamento dos domínios utilizados nas simulações com o modelo meteorológico WRF.	66
Figura 25: Níveis eta utilizados nas simulações com o modelo meteorológico WRF em ambas as versões (superior), com zoom nas primeiras 15 camadas (inferior).	67

Figura 26: Uso e ocupação do solo utilizado nas simulações (a) padrão e (b) urbana e os números das respectivas classes.	68
Figura 27: Localização das estações meteorológicas utilizadas na validação do modelo WRF.	79
Figura 28: Fotografias das estações meteorológicas inseridas na RMBH e vistas superiores.	81
Figura 29: Coordenadas geográficas de cada LCZ utilizadas no balanço energético pontual.	84
Figura 30: Cenário de expansão da mancha urbana da RMBH, com as classes de uso e ocupação do solo como definidas na Tabela 5, e o corte transversal AB usado para a análise da temperatura a 2m e altura da camada limite planetária.	85
Figura 31: Exemplos de erros de atribuição utilizando-se o método de classificação supervisionada: (a) LCZ 9, classificada como LCZ B; (b) LCZ E, classificada como LZC 1; e (c) LCZ 3, classificada como LCZ 1.	88
Figura 32: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Sete Lagoas.	93
Figura 33: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Confins.	93
Figura 34: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática da Pampulha/BH.	93
Figura 35: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Cercadinho/BH.	94
Figura 36: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Ibitité (Rola Moça)/BH.	94
Figura 37: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática da Sete Lagoas.	98
Figura 38: Séries horárias de umidade específica calculada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Confins.	98
Figura 39: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Pampulha/BH.	98
Figura 40: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Cercadinho/BH.	99
Figura 41: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Ibitité (Rola Moça).	99
Figura 42: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Sete Lagoas.	104
Figura 43: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Confins.	105
Figura 44: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Pampulha.	106
Figura 45: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Cercadinho.	107
Figura 46: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Ibitité.	108
Figura 47: Média dos horários (locais) de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, respectivamente, para temperatura a 2m e vento a 10m modelados pelo WRF padrão para a RMBH, com destaque para as cidades de 1) Belo Horizonte, 2) Betim, 3) Contagem, 4) Ibitité, 5) Ribeirão das Neves e 6) Santa Luzia.	110
Figura 48: Altimetria da RMBH e indicação das principais elementos topográficos, com a demarcação territorial dos municípios (linha pontilhada): (1) Serra do Curral, (2) Serra da Moeda, (3) Serra de Itabirito, (4) Serras de Capanema e do Caraça, (5) Serra do Gandarela e (6) Serra do Espinhaço.	111

Figura 49: Diferença da temperatura a 2m horária média (°C) entre o uWRF e o WRF para 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h (horário local).	113
Figura 50: Fluxos médios de calor latente (Q_E) e sensível (Q_H) modelados pelos WRF e uWRF para às 15h (horário local).	115
Figura 51: Fluxos médios de calor do solo (Q_G) e saldo de energia (Q^*) modelados pelos WRF e uWRF para às 15h (horário local).	119
Figura 52: Fluxos médios de calor latente (Q_E) e sensível (Q_H) modelados pelos WRF e uWRF para às 21h (horário local).	121
Figura 53: Fluxos médios de calor do solo (Q_G) e saldo de energia (Q^*) modelados pelos WRF e uWRF para às 21h (horário local).	123
Figura 54: Categorias dominantes de textura do solo (top) do domínio D03, em que: 6 – <i>Loam</i> (limoso), 7 – <i>Sandy clay loam</i> (franco-argilo-arenoso), 9 – <i>Clay loam</i> (limo-argilosos) e 12 – <i>Clay</i> (argiloso).	127
Figura 55: Umidade inicial do solo ($m^3.m^{-3}$) provida pelos dados de <i>final analysis</i> do NCEP.	128
Figura 56: Diferença de temperatura horária média a 2m (°C) para os horários de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, entre as simulações do uWRF com o uso e ocupação do solo do cenário hipotético e o corrente.	132
Figura 57: Diferença entre os albedos superficiais dos cenários com uso e ocupação do solo corrente e o futuro.	134
Figura 58: Corte transversal AB no domínio D03 e os resultados para altura da camada limite (a) e temperatura a 2m (b), para o dia 05 de set-17, considerando os cenários atual e futuro de urbanização.	136
Figura 59: Temperatura a 2m horária média (°C) e superficial (<i>skin</i>) horária média (°C) para as razões H/W adotadas inicialmente (Ctrl.) e após a redução das larguras das vias (Mod.), para uma área de LCZ 1, respectivamente.	142
Figura 60: Velocidade do vento a 10m média (m/s) para as razões H/W adotadas inicialmente (Ctrl.) e após a redução das larguras das vias (Mod.), para uma área de LCZ 1.	142
Figura 61: Temperatura a 2m média (°C) e superficial (<i>skin</i>) média (°C) para a fração urbana adotada inicialmente (Ctrl.) e após um aumento de 10% (Mod.), para uma área de LCZ 1.	145
Figura 62: Temperatura a 2m média (°C) e superficial (<i>skin</i>) média (°C) para a fração urbana adotada inicialmente (Ctrl.) e após um aumento de 10% (Mod.), para uma área de LCZ 9.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudos recentes envolvendo a análise do clima urbano da RMBH.	52
Tabela 2: Precipitação mensal acumulada nas estações meteorológicas automáticas do INMET, presentes na RMBH.	57
Tabela 3: Características espectrais dos sensores OLI e TIRS do Landsat8.	60
Tabela 4: Característica de cada domínio utilizado nas simulações com o modelo meteorológico WRF.	67
Tabela 5: Denominação das classes de uso e ocupação do solo utilizadas (MODIS + LCZ). ..	69
Tabela 6: Frequência e altura média dos edifícios da RMBH.	70
Tabela 7: Parâmetros morfométricos da RMBH.	71
Tabela 8: Parâmetros térmicos, radiativos e aerodinâmicos das superfícies urbanas da RMBH.	73
Tabela 9: Parametrizações físicas testadas no modelo WRF padrão.	75
Tabela 10: Índices estatísticos utilizados na validação das simulações meteorológicas e os respectivos valores de referência.	78
Tabela 11: Altitude das estações meteorológicas de superfície inseridas na RMBH para validação das simulações do WRF.	79
Tabela 12: Critério para conversão das LCZ para o cenário de urbanização futuro proposto. ..	85
Tabela 13: Alteração da largura das vias para teste de sensibilidade do BEP.	86
Tabela 14: Alteração da fração urbana para teste de sensibilidade do BEP.	86
Tabela 15: Escolha das parametrizações mais adequadas aos estudos de qualidade do ar e do clima urbano, respectivamente, segundo critérios definidos.	91
Tabela 16: Classificação da velocidade do vento segundo a Escala de Beaufort.	92
Tabela 17: Indicadores estatísticos para a temperatura a 2m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.	94
Tabela 18: Indicadores estatísticos para a umidade específica a 2m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.	99
Tabela 19: Indicadores estatísticos para a velocidade do vento a 10m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.	100
Tabela 20: Indicadores estatísticos para a direção do vento a 10m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.	101
Tabela 21: Parâmetros da tabela de VEGPARAM.TBL do WRF para as classes de vegetação do MODIS presentes na área de estudo.	126
Tabela 22: Parâmetros da tabela de SOILPARAM.TBL do WRF para os tipos de solo presentes na área de estudo.	127
Tabela 23: Balanço energético médio da superfície para as diferentes classes urbanas da LCZ.	129
Tabela 24: Intensidade máxima da ilha de calor para o trecho c.61 – c.126, para os horários de 15h e 21h, modelados pela simulação urbana com o uso e ocupação do solo corrente (uWRF) e futuro (uWRF_cen).	140
Tabela 25: Intensidade da ilha de calor apresentada em um trecho da região centro-sul de Belo Horizonte com e sem correção altimétrica, para os horários de 15h e 21h, modelados pela simulação urbana com o uso e ocupação do solo corrente (uWRF) e futuro (uWRF_cen). ..	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARW – *Advanced Research WRF*

ASAS – *Alta Subtropical do Atlântico Sul*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

BEP – *Building Effect Parameterization*

BH – *Belo Horizonte*

BouLac – *Bougeault-Lacarrère*

BUBBLE - *Basel Urban Boundary Layer Experiment*

CMAQ – *Community Multi-scale Air Quality Model*

CPTEC – *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*

DESIREX - *Dual-use European Security IR Experiment*

DISME – *Distrito de Meteorologia*

ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ECT – *Energia Cinética Turbulenta*

fnl – *Final Analysis*

GFS – *Global Forecast System*

GriB - *Gridded Binary*

ICU – *Ilha de Calor Urbano*

INMET – *Instituto Nacional de Meteorologia*

INPE – *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

IOA – *Index of Agreement*

ISL – *Inertial Sublayer*

JBN - *Jatos de Baixos Níveis*

Landsat - *Land Remote Sensing Satellite*

LIDAR - *Light Detection And Ranging*

LCZ – *Local Climate Zones*

MAGE – *Mean Absolute Gross Error*

MB – *Mean Bias*

METROMEX - *Metropolitan Meteorological Experiment*

MMM – *Mesoscale and Microscale Meteorology*

MODIS – *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*

MSE – *Mean Square Error*

MYJ – *Mellor–Yamada–Janjic*

NCAR – *National Center for Atmospheric Research*
NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*
NMM – *Nonhydrostatic Mesoscale Model*
NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
NUDAPT - *National Urban Database and Access Portal Tool*
OLI - *Operational Land Imager*
OMM – *Organização Meteorológica Mundial*
PIB – *Produto Interno Bruto*
CLP – *Camada Limite Planetária*
REDEMET - *Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica*
RF – *Random Forest*
ROI – *Region of Interest*
RMBH – *Região Metropolitana de Belo Horizonte*
RMSE – *Root Mean Square Error*
RSL – *Roughness Sublayer*
SAGA – *System for Automated Geoscientific Analyses*
SLUCM – *Single-layer Urban Canopy Model*
SVF – *Sky View Factor*
TIRS – *Thermal Infrared Sensor*
UBL – *Urban Boundary Layer*
UCL – *Urban Canopy Layer*
UCM – *Urban Canopy Model*
UFMG – *Universidade Federal de Minas Gerais*
USGS – *United States Geological Survey*
uWRF – *Urbanized Weather Research and Forecasting*
WPS – *Weather Research and Forecasting Preprocessing System*
WRF – *Weather Research and Forecasting*
WRPLOT – *Wind Roses Plot*
WUDAPT – *World Urban Database and Access Portal Tools*
ZCAS – *Zona de Convergência do Atlântico Sul*

LISTA DE SÍMBOLOS

β – Razão de Bowen

B_c – Função que depende da resistência estomática da planta

C_e – Coeficiente de transferência para a umidade

C_h – Coeficiente de transferência de calor

C_p – Capacidade térmica do ar

CO – Monóxido de carbono

COV – Compostos orgânicos voláteis

δ – Fator sazonal que representa a variação da distribuição das raízes de um dado tipo de vegetação

ε – Emissividade térmica

η – Coordenada vertical eta

E_p – Evaporação potencial máxima de uma superfície dada nas condições atmosféricas consideradas

E_t – Transpiração da vegetação a partir da absorção de água pelas raízes no solo

F_1 – Função de estresse da vegetação relativa à chegada de radiação solar

F_2 – Função de estresse da vegetação relativa à temperatura do ar

F_3 – Função de estresse da vegetação relativa à umidade do ar

F_4 – Função de estresse da vegetação relativa à umidade do solo

H – Altura (*height*) das paredes dos edifícios do dossel urbano

$K\downarrow$ – Fluxo de radiação de onda curta descendente

$K\uparrow$ – Fluxo de radiação de onda curta ascendente

K_T – Condutividade térmica do solo

$L\downarrow$ – Fluxo de radiação de onda longa descendente

$L\uparrow$ – Fluxo de radiação de onda longa ascendente

v – Fração vegetada verde ou fotossinteticamente ativa

NO_x – Óxidos de nitrogênio

ρ – Densidade do ar

P_{sup} – Pressão na camada mais baixa do modelo WRF (superfície)

P_{top} – Pressão na camada mais alta do modelo WRF (topo)

$P(z)$ – Componente hidrostática da pressão na altitude z

R_c – Resistência estomática da planta

$R_{c_{min}}$ – Mínima resistência estomática da planta
 Q^* – Fluxo de radiação líquida do sistema Terra-atmosfera
 ΔQ_A – Variação do fluxo de calor adicionado ou retirado por advecção
 Q_E – Fluxo de calor latente
 Q_F – Fluxo de calor antropogênico
 Q_G – Fluxo de calor no solo
 Q_H – Fluxo de calor sensível
 ΔQ_S – Variação do fluxo de calor armazenado na camada urbana
 Q_v – Razão de mistura
 q_a – Umidade específica do ar no
 q_s – Umidade específica na superfície
 SO_x – Óxidos de enxofre
 θ – Conteúdo de água no solo (%)
 θ_a – Temperatura potencial no nível vertical mais baixo da atmosfera ou em alguma altura acima do solo específica
 θ_s – Temperatura potencial na superfície
 T_{solo} – Temperatura do solo
 T_{sk} – Temperatura na superfície do solo (*skin temperature*)
 σ – Constante de Stefan-Boltzmann
 S – Capacidade máxima de retenção de água pelo dossel das plantas
 T – Temperatura da superfície ou atmosfera
 U_a – Velocidade do vento
 \bar{u}' – Componente flutuante longitudinal da velocidade do vento
 \bar{v}' – Componente flutuante transversal da velocidade do vento
 \bar{w}' – Componente flutuante vertical da velocidade do vento
 W – Largura (*width*) das vias do dossel urbano
 W_c – Conteúdo de água interceptado pelo dossel das árvores
 Δz – Distância entre a superfície e o centro da camada superior do solo

1 INTRODUÇÃO

A substituição de cobertura vegetal por edifícios e áreas impermeabilizadas têm impacto substancial nas condições da baixa atmosfera, à medida em que modifica as taxas de evaporação, o balanço energético superficial, as características do escoamento e a composição natural do ar (GUTIÉRREZ *et al.*, 2015; OKE *et al.*, 2017). Inevitavelmente, como a formação das condições meteorológicas locais também dependem dos fatores supracitados, seu estado encontra-se constantemente interligado aos fenômenos que se desenvolvem em superfície (CHRISTEN e VOGT, 2004; ARNFIELD, 2003).

Um dos efeitos mais pronunciados e discutidos da urbanização é a formação da ilha de calor, caracterizada pelas diferenças de temperatura entre áreas urbanas e as áreas rurais adjacentes (OKE, 1973). As mudanças nas propriedades físicas da superfície, sua impermeabilização com a conseqüente redução da umidade, a liberação de calor antropogênico, além de alterações nos fluxos radiativos em virtude da complexa geometria urbana, provocam o resfriamento tardio das cidades comparativamente às áreas vegetadas (OKE *et al.*, 2017). A tendência é que a magnitude do fenômeno se intensifique ainda mais com o aumento das cidades e o processo de verticalização, já sendo registrado para grandes cidades como, Tóquio/Japão e São Paulo/Brasil, diferenças de temperatura superficiais maiores que 5°C (PENG *et al.*, 2012).

Um aumento das temperaturas nas cidades pode resultar em um maior consumo de energia com sistemas de refrigeração nos ambientes internos (SALAMANCA *et al.*, 2014), diminuição do conforto térmico humano e problemas de saúde. Ilhas de calor urbano têm sido frequentemente apontadas como fator agravante de episódios de ondas de calor, tornando-os mais intensos e longos (TAN *et al.*, 2010; STONE, 2012). O estresse térmico provocado pela combinação de tais eventos podem levar à um maior risco de desenvolvimento de doenças cardíacas e acidentes vasculares cerebrais (USEPA, 2016). Além disso, pode-se citar, ainda um possível favorecimento da expansão geográfica e da janela de transmissão de várias doenças causadas por vetores, como a malária e a dengue (DHIMAN *et al.*, 2010).

De desenvolvimento relativamente recente, o estudo do clima urbano tem ganhado importantes ferramentas computacionais capazes de simular os efeitos das cidades na atmosfera. Atualmente, existem modelos de mesoescala, como o *Weather Research and Forecasting* (WRF), que permitem representar os fenômenos que ocorrem na atmosfera urbana por meio da

acoplagem à esquemas denominados *Urban Canopy Models* (UCM) ou modelos de dossel urbano. Desenvolvido por Martilli *et al.* (2002), o módulo *Building Effect Parameterization* (BEP) é um tipo de UCM capaz de determinar a distribuição de calor, umidade e momentum dentro da camada urbana, tridimensionalmente. Para isso, são necessárias informações detalhadas sobre as características da superfície, a geometria da cidade, a cobertura do solo e materiais típicos.

Entre os diversos métodos para classificar as cidades para tal fim, está aquela proposta por Stewart e Oke (2012), denominada de *Local Climate Zones* (LCZ) ou Zonas Climáticas Locais. Nesta, as classes urbanas são agrupadas em ocorrências típicas que se diferem umas das outras pelo grau de verticalização e adensamento, materiais constituintes e cobertura do solo, principalmente. Desta forma, o BEP leva em consideração as características de cada cidade, possibilitando a realização de diversos estudos no âmbito do clima urbano como a investigação da alteração de parâmetros meteorológicos decorrentes da urbanização (YU e LIU, 2015; GIOVANNINI *et al.*, 2014), modelagem da formação de ilhas de calor (SHARMA *et al.*, 2014), medidas para sua mitigação e estratégias de planejamento urbano (FALLMANN *et al.*, 2013), além do fornecimento de uma estimativa mais precisa dos parâmetros meteorológicos para outros usos (JANDAGHIAN *et al.*, 2017).

Dado que a aglomeração em zonas urbanas é uma tendência mundial, sendo esperado que 68% da população esteja concentrada nessas áreas até o ano de 2050 (UN, 2018), faz-se necessário testar as ferramentas disponíveis para o estudo dos efeitos da ocupação urbana nos processos que ditam a formação das condições meteorológicas, cabendo ressaltar a importância desta na vida cotidiana da população e na manutenção de serviços essenciais. A meteorologia se faz presente em diversos setores como o energético, de produção agrícola, abastecimento de água, aviação e da defesa civil, tendo profundo impacto também na saúde e bem-estar da população. Neste contexto, este estudo teve como objetivo geral analisar as modificações produzidas pela acoplagem do módulo urbano do BEP no modelo meteorológico WRF, para fins de avaliação da ferramenta e de aplicação no estudo do clima urbano de uma importante região do Brasil.

A área de estudo escolhida foi a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que se justifica pela sua importância econômica e política no país, e pelo sabido controle exercido pelo uso e ocupação do solo na alteração do clima local, ao longo dos anos. A partir do aumento da urbanização, iniciada na década de 1940, e a progressiva diminuição de áreas verdes urbanas,

a impermeabilização do solo, o adensamento das edificações, a emissão de poluentes pelo parque industrial e pela frota de veículos e a canalização de córregos, tem sido relatada perturbação em alguns parâmetros meteorológicos, principalmente temperatura e umidade, quando tomado por base as condições climáticas naturais, registradas a partir da implantação da cidade, no final do século XIX (ASSIS, 2010). Apesar da importância do fenômeno da urbanização na região, observam-se poucos trabalhos que avaliem o impacto urbanização nas condições meteorológicas locais por meio do uso de modelagem.

Para a consecução do objetivo supracitado, inicialmente, a área de estudo foi classificada de maneira adequada ao estudo do clima urbano. Subsequentemente, o modelo WRF tanto em sua versão padrão quanto a urbana (acoplada ao BEP) foi validado, a partir do teste com diferentes parametrizações até obtenção de uma condição de trabalho satisfatória, verificada comparando-se os dados modelados com os dados observados em estações meteorológicas. A partir da simulação controle foi possível averiguar as diferenças provocadas pela ativação do modelo de dossel urbano nas variáveis meteorológicas propostas, bem como identificar as limitações referentes a cada abordagem. Posto que grande parte dos dados de entrada usados para a inicialização do BEP foram adotados da literatura, a sua sensibilidade também foi testada, de modo a auxiliar na justificativa de eventuais erros gerados pela atribuição equivocada de parâmetros de entrada. Por fim, foi simulado um cenário hipotético de expansão da mancha urbana para averiguação do impacto nas condições meteorológicas locais.

O estudo do tema proposto justifica-se, então, pela importância do fenômeno na qualidade ambiental na RMBH, pela escassez de trabalhos produzidos na área considerada e pela abordagem por meio de uma ferramenta ainda não utilizada. O estudo dos parâmetros meteorológicos nas cidades também é útil para orientar ações de planejamento urbano e estudos hidrológicos, além de se constituir como dado de entrada essencial em diversos diagnósticos ambientais, incluindo a avaliação da qualidade do ar.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito da acoplagem de esquema de dossel urbano no modelo meteorológico WRF e aplicá-lo ao estudo do clima urbano da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

2.2 Objetivos específicos

- Classificar a RMBH de forma compatível aos estudos do clima urbano;
- Validar o modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting* (WRF) padrão e acoplado ao esquema de dossel urbano do *Building Effect Parameterization* (BEP) para a RMBH em um período seco;
- Avaliar horizontalmente as diferenças produzidas nas condições meteorológicas após a acoplagem do esquema de dossel urbano.
- Estudar o impacto de um cenário hipotético de expansão da mancha urbana da RMBH nos campos meteorológicos, horizontalmente e verticalmente em um corte transversal específico sobre a área de estudo;
- Testar a sensibilidade do BEP a partir da alteração de parâmetros do dossel urbano.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Interação da superfície urbana com a atmosfera*

A atmosfera terrestre pode ser dividida conceitualmente em várias camadas de acordo com suas características físicas e químicas. Significativa parte das mudanças impostas à dinâmica da baixa atmosfera é originária de processos impelidos pela superfície, seja ela natural ou antropizada, tais como a evapotranspiração, forças de arraste, modificação no fluxo induzida pela topografia, entre outros (STULL, 1988). À esta camada, extensão vertical máxima em que a superfície é capaz de induzir algum efeito na atmosfera, dá-se o nome de camada limite planetária (CLP).

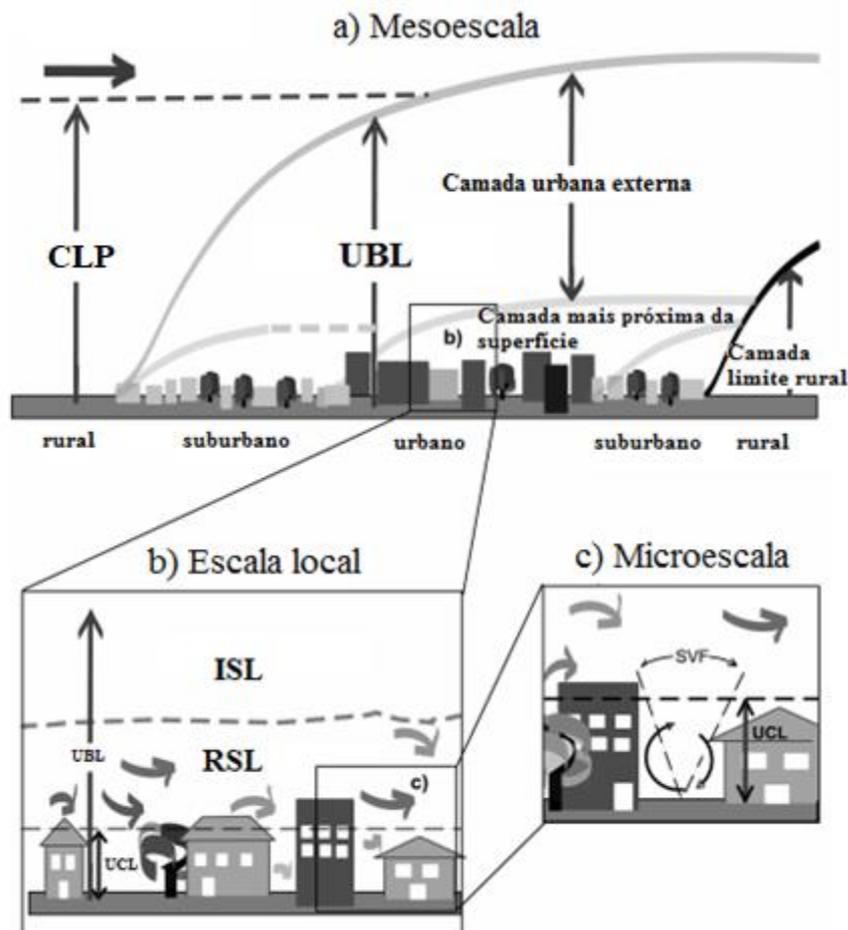
Comparativamente, a transição entre diferentes tipos de cobertura do solo, como das áreas rurais para as urbanas, alteram de forma distinta a baixa atmosfera. A ilha de calor urbana (ICU), formada pelas diferenças estruturais e de cobertura dos solos urbanos e rurais (STEWART e OKE, 2012), por exemplo, é considerada uma das consequências mais significativas da urbanização e da industrialização no século XXI (WANG *et al.*, 2017). O processo de urbanização, então, é responsável por modificar drasticamente as propriedades radiativas, térmicas, hídricas e aerodinâmicas de uma região.

Devido a este ambiente próprio, sobre as cidades se desenvolvem diferentes padrões de circulação que alteram os parâmetros meteorológicos. Tal conjunto de mudanças implica em alterações nas propriedades da CLP, gerando a camada limite urbana ou *urban boundary layer* (UBL), representada na Figura 1(a). Esta definição, amplamente utilizada nos estudos do clima urbano, se refere a atmosfera sobre as cidades cujas características são produzidas pela interação com os elementos da superfície urbana, consistindo em um fenômeno de escala local a mesoclimática (OKE *et al.*, 2017). Outras subdivisões da UBL importantes para o estudo do clima urbano são dadas a seguir (OKE *et al.*, 2017), bem como a representação esquemática das camadas:

- Camada do dossel urbano ou *urban canopy layer* (UCL): porção localizada abaixo do nível dos telhados (Figura 1c), com algumas dezenas de metros, gerada por processos em microescala;

- Subcamada rugosa ou *roughness sublayer* (RSL): porção de algumas dezenas de metros, em que o escoamento ainda é afetado por elementos rugosos individuais. Estende-se do nível do solo de duas a cinco vezes a altura das edificações/árvores (Figura 1b);
- Subcamada inercial ou *inertial sublayer* (ISL): porção localizada acima da RSL (Figura 1b) na qual a turbulência gerada por cisalhamento cria um perfil logarítmico para o vento e a variação dos fluxos turbulentos é pequena (<5%);

Figura 1: Representação da camada limite urbana e das subcamadas geradas em diferentes escalas - (a) mesoescala, (b) escala local e (c) microescala.



Fonte: Adaptado de PIRINGER e JOFFRE, 2005.

Sob a perspectiva da microescala, um dos principais elementos responsáveis por modificar as propriedades da superfície é a cobertura pelo tecido urbano. Composto por materiais naturais ou não (concreto, asfalto, metais, vidro, etc.), este determina as propriedades radiativas, térmicas e de umidade de uma superfície, alterando sua capacidade de aceitar, transferir e reter calor e água (OKE *et al.*, 2017). Para entender o seu papel, é importante conhecer o balanço energético das superfícies nas cidades. Para o período diurno, tem-se que (OKE *et al.*, 2017):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (2)$$

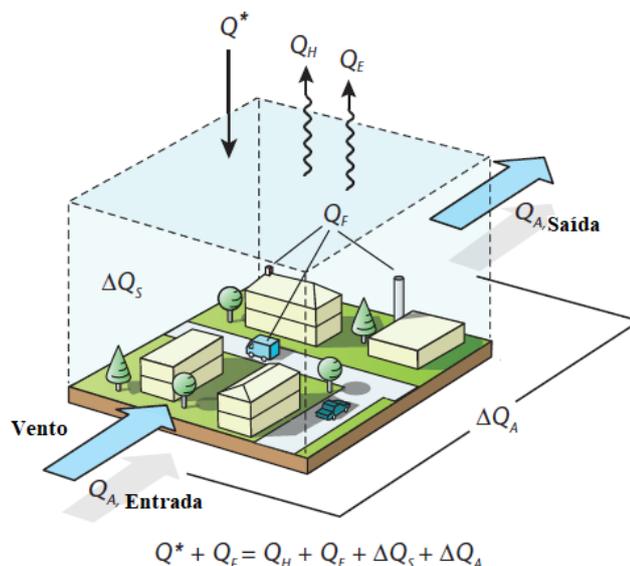
Em que: Q^* é o fluxo de radiação líquida do sistema Terra-atmosfera; K é o fluxo de radiação de onda curta descendente (\downarrow) e ascendente (\uparrow); L é o fluxo de radiação de onda longa descendente (\downarrow) e ascendente (\uparrow); Q_F é o fluxo de calor antropogênico; Q_H é o fluxo de calor sensível; Q_E é o fluxo de calor latente de vaporização da água; ΔQ_S é a variação de calor armazenado em toda a camada urbana; e ΔQ_A é o termo referente à advecção. Todas as unidades são dadas em $W.m^{-2}$.

O lado esquerdo da equação indica a energia disponível no período diurno, a fonte de energia para os processos físico-químicos que ocorrem no sistema superfície-atmosfera (LIMA *et al.*, 2009). A principal fonte de energia é o Sol (K), que após à interação com o sistema Terra-atmosfera pode ser refletida ou absorvida. Quando absorvida é reemitida em forma de radiação de onda longa (L), tanto pela superfície terrestre quanto pela própria atmosfera, gerando fluxos ascendentes e descendentes (OKE, 1987). Nas cidades, a outra fonte de energia disponível é a proveniente das atividades humanas (Q_F), resultante das emissões dos veículos, habitações, indústrias e indivíduos (SAILOR *et al.*, 2015).

A energia disponível pode, então, ser particionada entre os fluxos de energia superficiais. No lado direito da equação tem-se a dissipação convectiva da energia líquida em forma de calor latente (Q_E) ou calor sensível (Q_H) (OKE, 1987). O termo ΔQ_S representa o armazenamento de calor no ar, no solo e nas superfícies urbanas, como os edifícios e árvores. Por fim, o termo referente à advecção (ΔQ_A) é relativo ao transporte horizontal de calor.

Na Figura 2, é possível observar um esquema com o balanço para um volume edificação-solo para o período diurno, no qual a energia líquida é dada por Q^* e Q_F ; as perdas são dadas pela liberação de calor latente e sensível, podendo o termo relativo à advecção contribuir ou não para sua dissipação; e no qual certa parcela de energia é armazenada no sistema.

Figura 2: Representação dos fluxos envolvidos no balanço energético da superfície para um volume de edificação-solo-ar durante o período diurno em uma área urbana, no qual as setas dirigidas para cima indicam perda de energia e as dirigidas para baixo indicam ganho de energia.



Fonte: Adaptado de OKE *et al.*, 2017.

Frequentemente, o balanço referido na Eq. 1 é simplificado, com a eliminação dos termos referentes ao fluxo de calor antropogênico, calor armazenamento na camada urbana e aquele transportado por advecção, sendo estes considerados de difícil mensuração ou estimativa (SARMIENTO *et al.*, 2017). Assim, o balanço energético para uma superfície ideal, em uma camada infinitesimal, pode ser expresso como determinado na Eq. (3) (OKE *et al.*, 2017):

$$Q^* = Q_E + Q_H + Q_G \quad (3)$$

Em que Q_G é o calor armazenado no solo por meio de condução ($W.m^{-2}$).

As principais propriedades dos materiais que influenciam no balanço energético da superfície são o albedo superficial, a emissividade, a capacidade e a condutividade térmicas. Quanto maior o albedo, ou a capacidade de refletir radiação solar, menores são as frações absorvidas e reemitidas em forma de onda longa (SANTAMOURIS, 2011). Elementos naturais, como as florestas e corpos d'água, também possuem baixo albedo, mas devido a sua composição e umidade, a absorção de radiação por estes não implica na elevação de temperatura, uma vez que parte do calor é usada na evaporação da água, ou seja, é dissipado como calor latente (ASSIS, 2010).

Já a facilidade com que um material emite a radiação absorvida depende de sua emissividade térmica (ϵ) e temperatura, que é controlada por seu balanço térmico, logo dependente também

das trocas condutivas e convectivas (OKE *et al.*, 2017; SANTAMOURIS, 2011). Grande parte das superfícies (concreto, telhas de cerâmica, revestimento asfáltico, reboco, vidro, tintas, etc.) nas cidades apresenta alta emissividade, com valores usualmente maiores que 0,8, (numa escala que varia entre 0 e 1) (ABNT, 2003).

Um estudo realizado em uma região tropical do Brasil, avaliou o comportamento térmico do pavimento asfáltico ao longo do dia. Foi medido um albedo médio de 0,16, temperaturas superficiais externas superiores a 50°C e fluxo máximo de calor armazenado no solo (245 W.m⁻²) superior aos apresentados por solos desprovidos de vegetação (160 W.m⁻²) ou pavimentados por concreto (180 W.m⁻²) (CALLEJAS *et al.*, 2015). O asfalto é o material mais utilizado no Brasil para a pavimentação de áreas urbanas, atuando como um dos principais moduladores das altas temperaturas neste meio (MONTEIRO e LEDER, 2011; CALLEJAS *et al.*, 2015).

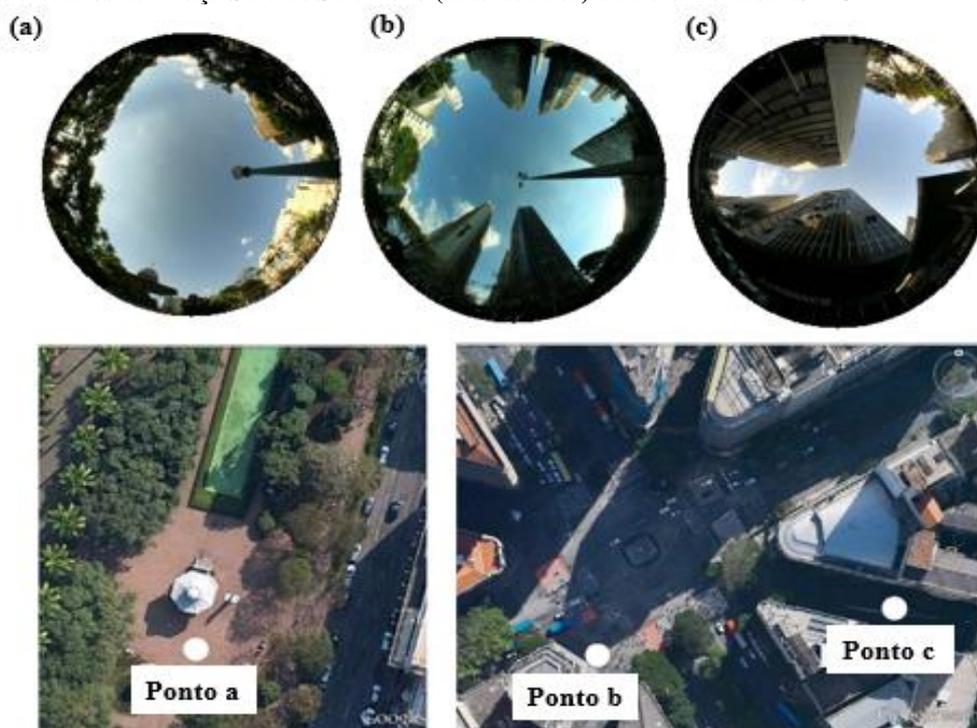
Uma importante característica da superfície urbana que altera o perfil da temperatura próxima à superfície é a habilidade em armazenar calor durante o dia, liberando-o gradativamente durante a noite e atrasando o resfriamento noturno natural. A propriedade dos materiais que quantifica tal habilidade é a sua capacidade térmica. Juntamente com a condutividade térmica (facilidade com que um material é capaz de transferir calor por condução, dado um gradiente de temperatura), é usada na determinação de propriedades derivadas que governam a partição de calor entre o ar e a superfície (admitância térmica) e indicam a facilidade/tempo com que um sinal de temperatura é transmitido por um material (difusividade térmica) (OKE *et al.*, 2017).

Desta forma, materiais com alta capacidade em armazenar calor e em conduzi-lo, possuem altas admitâncias térmicas e são mais propensos ao sequestro de calor durante o dia, fazendo com que exista menos energia disponível para o aquecimento do ar, o que contribui para o controle diurno da temperatura. Por sua vez, durante o período noturno, quando há a inversão do gradiente de temperatura, o calor armazenado é liberado. A rapidez com que o material reage às mudanças de temperatura na interface solo-atmosfera é, então, determinada pela difusividade térmica, que auxilia na previsão do tempo requerido para o processo de resfriamento. Dessa forma, a escolha dos materiais deve ser objeto de atenção de arquitetos e planejadores urbanos, na tentativa de reduzir as temperaturas nas cidades de forma a melhorar o conforto térmico e a diminuir o uso de sistemas de refrigeração nos edifícios, especialmente, em cidades de clima tropical.

Outro elemento importante a ser analisado nas cidades é o arranjo espacial das edificações, ou seja, suas dimensões, espaçamento entre construções e largura de vias. A maior absorção de energia nas cidades está relacionada não somente às características dos materiais dos quais elas são constituídas, mas também à forma de espacialização. Alguns parâmetros das cidades auxiliam na previsão do controle exercido sobre as trocas radiativas entre as superfícies e a atmosfera. São importantes a razão H/W, a orientação das ruas (acesso solar) e o fator de visão de céu ou *sky view factor* (SVF).

O primeiro item fornece uma ideia de densidade de edificações em uma cidade e é calculado dividindo-se a altura (H) das paredes do cânion urbano pela largura (W) de suas vias. Juntamente com a orientação da rua, indica qual é a exposição à radiação solar. Quanto maior a razão H/W, menor é a abertura existente no topo do cânion urbano para entrada ou saída de radiação em um dado ponto (BROWN *et al.*, 2001) ou fator de visão de céu¹, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Fator de visão do céu para (a) um ponto na Praça da Liberdade (região centro-sul) e para (b)(c) dois pontos distintos na Praça Sete de Setembro (área central) de Belo Horizonte/MG.



Fonte: Adaptado de HIRASHIMA, 2014.

¹ O fator apresenta valores entre zero e um, aumentado à medida em que a obstrução do céu por obstáculos diminui.

A influência da geometria no clima urbano, porém é complexa. Uma elevada razão H/W, a princípio, reduz a incidência da radiação solar direta na superfície do solo durante o dia devido a ocorrência de sombreamento (BAKARMAN e CHANG, 2015; HOLMER *et al.*, 2007), porém beneficia o fenômeno do aprisionamento de radiação (tanto de onda curta quanto de onda longa) no cânion urbano, contribuindo, especialmente, para o atraso do resfriamento noturno de áreas densamente ocupadas e verticalizadas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2012; OKE, 1981). A predominância de um efeito sobre outro, porém deve ser investigada.

Hamdi e Schayes (2008), em um estudo da influência da geometria urbana na intensidade da ilha de calor na cidade da Basileia/Suíça, verificaram que a diminuição da relação (H/W = 0,43) levou à obtenção de menores temperaturas diurnas que o cenário de controle (H/W = 1). Era esperado que um cânion mais largo, devido à um menor sombreamento apresentasse o resultado contrário. Foi pressuposto, então, que o efeito do aprisionamento de radiação seja mais relevante, neste caso, para um aumento na temperatura. Logo, com a diminuição da densidade dos prédios este fenômeno foi atenuado, justificando o resultado encontrado.

As edificações também exercem influências térmicas e mecânicas no fluxo do vento, alterando sua velocidade, direção e produzindo fenômenos aerodinâmicos (efeito pilotis, Venturi, de canto, etc.) específicos dependendo da configuração da ocupação (BARBIRATO *et al.*, 2007). Na camada limite planetária, o transporte é dominado na horizontal pelo vento médio e na vertical pela turbulência de origem térmica e mecânica. A capacidade de resposta rápida da atmosfera (em torno de uma hora) aos fenômenos que ocorrem na superfície reside justamente nas propriedades deste fluxo turbulento, em ser um efetivo distribuidor de momentum, calor e massa. A Energia Cinética Turbulenta (ECT) é o parâmetro a partir do qual se pode medir qual é a intensidade da turbulência, sendo muito importante para a micrometeorologia (STULL, 1988). Dele se pode inferir o quão rápido o calor, água e poluentes serão misturados e dispersos na atmosfera urbana. A ECT por unidade de massa é determinada pela soma das variâncias de velocidade, divididas por dois, como demonstrado na Eq. (4) (ŠAVLI, 2012):

$$\frac{ECT}{m} = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2} \quad (4)$$

Em que: *ECT* é a energia cinética turbulenta por unidade de massa ($m^2.s^{-2}$); $\overline{u'}$, $\overline{v'}$, e $\overline{w'}$ são, respectivamente, as componentes das flutuações da velocidade ($m.s^{-1}$) longitudinal, transversal e vertical do vento em relação à média.

A turbulência pode ser gerada por processos mecânicos e/ou térmicos. A turbulência mecânica é formada a partir de forças de fricção ocasionadas pelo atrito da passagem do ar por elementos rugosos na superfície (árvores, arbustos, vegetação rasteira, relevo e construções) e por forças de arraste induzidas pelas paredes de obstáculos (como os edifícios), com a consequente perda de momentum (OKE *et al.*, 2017). Já a turbulência térmica é gerada a partir do aquecimento da superfície. Parcelas de ar com maior temperatura possuem menor densidade e são transportadas para níveis superiores pela força do empuxo (VINNICHENKO *et al.*, 2013). Este movimento convectivo é o principal meio de transportar verticalmente o excedente de energia diurna da superfície durante o período noturno (OKE, 1987).

Por fim, as atividades que são desenvolvidas nas cidades também interferem no balanço energético do sistema Terra-atmosfera, devido a liberação de vapor d'água, calor, além de poluentes sólidos e gasosos, tais como material particulado primário carbonáceo e não carbonáceo, óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV), etc. (SEINFELD e PANDIS, 2016; KUMAR *et al.*, 2015). As emissões antropogênicas podem exercer impacto direto ou indireto na atmosfera. O primeiro está relacionado com a liberação de calor e vapor resultantes da conversão de energia química e elétrica por veículos, edificações e indústrias, e o segundo com a interação dos poluentes com a radiação na atmosfera, a atuação como núcleos de condensação de nuvens e no balanço energético global, se gases de efeito estufa (OKE *et al.*, 2017).

A partir da observação dos fenômenos, processos e interações citadas, verifica-se que os efeitos da ocupação urbana ocorrem em diferentes escalas, tanto no tempo quanto nas dimensões espaciais (BRITTER e HANNA, 2003), sendo relatada a detecção de alterações nas condições meteorológicas e climáticas em diversas regiões por diferentes estudos. Foram observadas ou simuladas mudanças em parâmetros como temperatura (KOOMEN e DIOGO, 2017; SUN *et al.*, 2016; CLARKE *et al.*, 2010; GALLO *et al.*, 1996), precipitação (SEINO *et al.*, 2018; SONG *et al.*, 2014), circulação do vento (LIU *et al.*, 2018; FAMELI *et al.*, 2013) e fluxos superficiais (SATI e MOHAN, 2017; OFFERLE *et al.*, 2006; CARLSON *et al.*, 1981), evidenciando o impacto da nas características da atmosfera em baixos níveis causado pela mudança no uso e ocupação do solo em escalas locais e regionais.

3.2 Modelo meteorológico WRF

O *Weather Research and Forecasting Model* é a última geração de modelo numérico de previsão do tempo e de simulação atmosférica, simulando o fluxo da atmosfera em um cubo 3D com espaçamentos de grade partindo de dezenas de metros até milhares de quilômetros (SKAMAROCK *et al.*, 2008). Fruto de um esforço colaborativo entre diversas instituições norte-americanas, como a *Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division* do *National Center for Atmospheric Research (NCAR)* e o *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* do *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, o modelo é de domínio público e gratuitamente disponível para uso.

A estrutura do WRF possui duas opções de núcleos dinâmicos, o *Advanced Research WRF (ARW)* e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)*, sendo o primeiro mais usado para fins de pesquisa e o segundo para demandas operacionais. As aplicações são diversas e incluem pesquisas meteorológicas, previsão numérica operacional do tempo, simulações climáticas e da qualidade do ar, previsão de comportamento de queimadas florestais, estudos de tempestades tropicais, entre outras. Para a realização de tais aplicações, os modelos numéricos necessitam da reunião de diversas informações, processando-as de forma segmentada e sequencial até obtenção do dado modelado. Nos itens subsequentes serão discutidos os termos que tornam a modelagem meteorológica possível.

3.2.1 Formulação geral do modelo

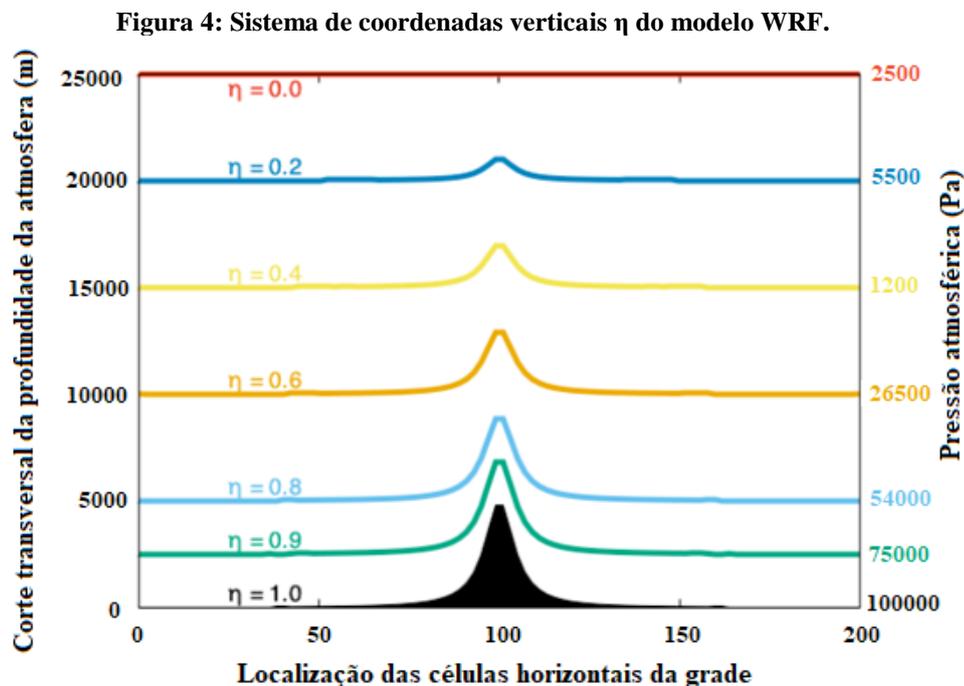
O WRF-ARW é um modelo totalmente compressível, euleriano não hidrostático e conservativo para variáveis escalares (SKAMAROCK *et al.*, 2008). As equações governantes são baseadas nos princípios de conservação da quantidade de movimento, massa e energia, a partir das quais é possível descrever o escoamento de fluidos e as relações entre as mudanças de pressão, energia e densidade experimentadas, neste caso, por uma parcela atmosférica quando submetidas a forças diversas (OKE *et al.*, 2017). As equações de Euler, como são chamadas, são uma simplificação das equações de Navier-Stokes, a partir da consideração do ar como um fluido não viscoso. O detalhamento das equações governantes bem como os métodos numéricos utilizados para resolução podem ser consultadas em Skamarock *et al.* (2008). Tais equações são escritas na forma de fluxo e formuladas usando coordenadas verticais de massa (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

Também chamadas de coordenadas η (*eta*), as coordenadas verticais têm a vantagem de permitir a introdução da topografia no modelo, de modo a evitar sua intersecção e o “desaparecimento” dos parâmetros meteorológicos nestes trechos, ou seja, os níveis verticais acompanham a topografia do terreno. A cada nível vertical é atribuída uma coordenada, variando de um (na superfície) a zero (até o topo da fronteira superior do modelo)(SANTIAGO, 2009). Matematicamente, as coordenadas verticais são calculadas a partir da normalização da componente hidrostática da pressão, como expresso na Eq. (5) (GIORDANO *et al.*, 2013):

$$\eta = \frac{P(z) - P_{top}}{P_{sup} - P_{top}} \quad (5)$$

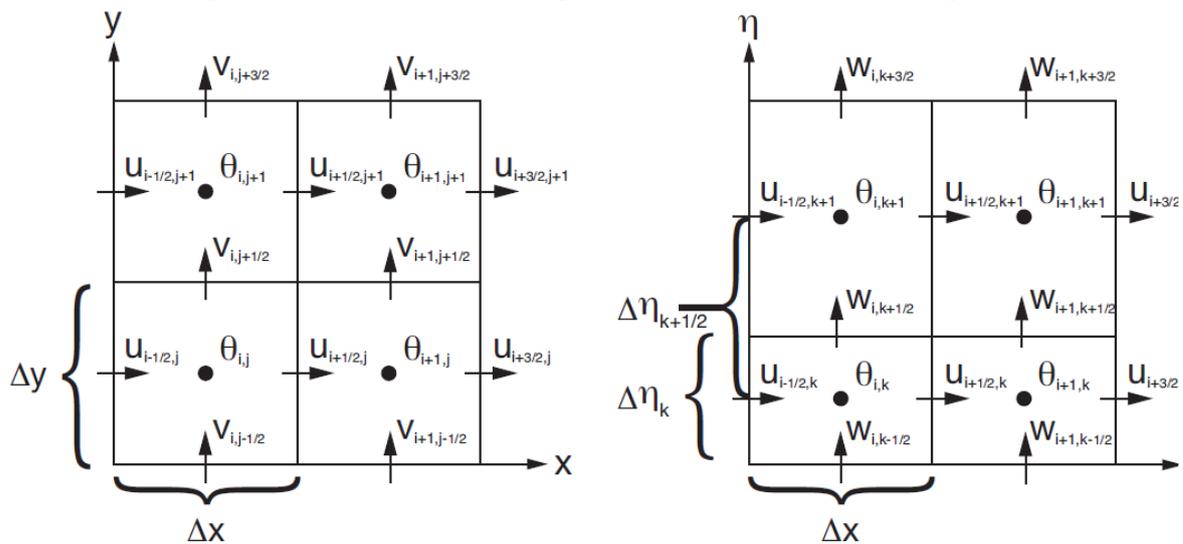
Em que: $P(z)$ é a componente hidrostática da pressão na altitude z ; P_{top} e P_{sup} são os valores da pressão no nível mais alto (topo) e mais baixo (superfície) do modelo, respectivamente.

Na Figura 4, encontra-se ilustrada uma representação das coordenadas η , na qual é possível que o espaçamento vertical seja não uniforme, permitindo uma maior resolução próximo à superfície. Tal configuração é necessária para uma melhor discretização da variação dos parâmetros meteorológicos ocasionada pela interação do solo com a camada limite planetária, bem como da região de interface entre troposfera e estratosfera, devido a variações verticais rápidas no campo de temperatura, principalmente.



Horizontalmente, a discretização espacial baseia-se no uso de grades de Arakawa do tipo C (ARAKAWA e LAMB, 1977). A saída das variáveis modeladas, tanto na direção horizontal quanto vertical, para cada célula da grade são escalonadas conforme indicado na Figura 5. Neste tipo de grade as variáveis termodinâmicas e de umidade são calculadas para o centro da grade ou centro de massa (indicada por θ), enquanto as variáveis dinâmicas são alocadas nas laterais. Os índices (i, j, k) fazem referência ao eixo de localização de cada variável, se na direção do eixo x , eixo y ou dos níveis η (vertical). As variáveis u, v e w indicam as componentes horizontais e vertical da velocidade, respectivamente. Os valores numéricos que acompanham os índices indicam distância relativa, desta forma as velocidades normais encontram-se afastadas em metade do comprimento de grade de distância das variáveis termodinâmicas. Os espaçamentos Δx e Δy são constantes, e sua correção para diferentes tipos de projeções é feita por um fator de mapa (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

Figura 5: Grade horizontal (à esq.) e vertical (à dir.) de Arakawa tipo C.



Fonte: SKAMAROCK *et al.*, 2008.

3.2.2 Alocação geográfica, condições iniciais e de contorno

A definição da área estudo no modelo meteorológico do WRF é realizada por meio da alocação de domínios ou grades em uma região do globo terrestre tomando por base uma coordenada central. O modelo também permite a configuração de aninhamento (*nesting*), possibilitando que uma maior resolução seja aplicada em uma região de interesse a partir da introdução de grades internas adicionais. As razões para a utilização do aninhamento estão frequentemente relacionadas à necessidade de representação de fenômenos em escala local sem a desvantagem

de executar a simulação para domínios muito extensos e de alta resolução, que demandam maior capacidade de processamento dos computadores, tempo e memória para armazenamento, assim como a necessidade de utilização de dados iniciais e de contorno em uma melhor resolução.

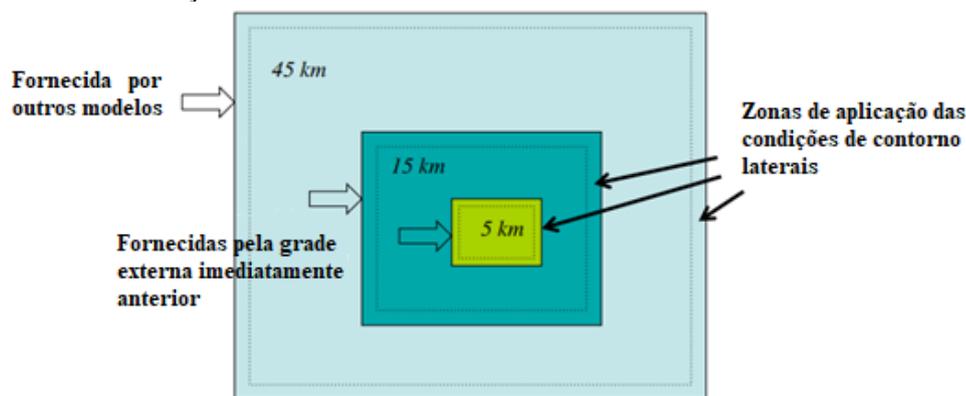
Após a delimitação da área de interesse, são necessárias ainda algumas informações complementares, como dados geográficos estáticos, condições iniciais e de contorno. Os primeiros são informações bidimensionais que são interpoladas horizontalmente para as grades definidas, incluindo informações sobre albedo, topografia, uso e ocupação do solo, tipos de solo, índice de área foliar e fator de escala de mapas. Tais dados podem ser adquiridos a partir de um banco de dados suportado pelo modelo ou inseridos pelo próprio usuário, caso este deseje informações específicas mais atualizadas ou de melhor resolução.

Além de informações sobre a superfície, também faz-se necessária a determinação das condições iniciais. Como o nome já indica, estas fornecem os valores iniciais para as variáveis do modelo para todos os pontos da grade em todas as direções, retratando o estado da atmosfera no tempo $t=0$. São dados tridimensionais dependentes do tempo, específicos, portanto, para o período a ser estudado. Tais informações são provenientes de bancos de dados externos ao WRF, sendo comumente utilizadas as previsões geradas pelo modelo *Global Forecast System* (GFS) do NCEP. Neste modelo global são assimilados dados observados (*observational nudging*²) em todo o mundo em estações de superfície, balões meteorológicos, perfiladores de vento, relatórios de aeronaves, bóias em alto mar, radares e satélites. As variáveis geradas pelo GFS utilizadas como dado de entrada no WRF incluem pressão ao nível do mar, temperatura da superfície do mar, componentes zonal e meridional do vento, umidade do solo, vorticidade, concentração de ozônio e escoamento superficial (*runoff*).

Já as condições de contorno têm como objetivo integrar a influência dos fluxos advectados de regiões adjacentes às laterais das grades definidas, podendo ser obtidas de duas fontes, de dados modelados por um domínio de maior abrangência (global ou regional) ou originária de domínios mais externos (*parent domain*), caso esta seja uma grade aninhada, como pode ser observado na Figura 6.

² O objetivo do *observational nudging* é adicionar um termo de tendência artificial a uma ou mais equações prognósticas do modelo meteorológico de forma a fazê-lo convergir ao estado de observação (LI *et al.*, 2016).

Figura 6: Fontes das condições de contorno lateral dos domínios definidos no modelo meteorológico WRF.

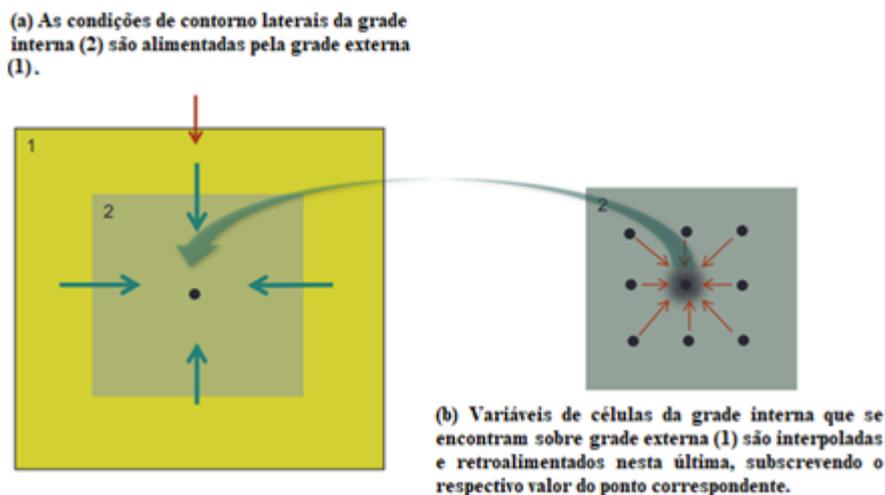


Fonte: Adaptado de WANG e GILL, 2012.

A interação entre as grades externas e internas pode ser unidirecional (*one-way*) ou bidirecional (*two-way*). Em ambas as opções, as condições de contorno da grade interna (ou seja, os limites laterais) são interpoladas a partir da previsão da grade externa. Para o modo unidirecional, essa é a única troca de informações entre elas. Já para o segundo caso, a interação entre os domínios mais externos e internos é permitida tanto nos limites laterais quanto nos pontos da grade externa que se encontram dentro da grade interna, em uma espécie de feedback, como ilustrado na Figura 7.

Simulações com domínio único e o domínio mais externo de simulações com aninhamento são exemplos de interação unidirecional, enquanto as grades internas de domínios aninhados são exemplos de interação bidirecional, se assim configurado. Bem como as condições iniciais, as condições de fronteira lateral usualmente utilizadas são as fornecidas pelo modelo GFS do NCEP. A resolução temporal máxima para a qual os dados do modelo global estão disponíveis é de 6h em 6h, enquanto os espaçamento de grade podem variar entre $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e $1^\circ \times 1^\circ$, dependendo da data selecionada. É importante ressaltar que tanto para as condições iniciais quanto laterais, existem fontes alternativas de dados como os fornecidos pelo modelo global do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Figura 7: Domínios aninhados bidirecionalmente (*two-way nesting*).



Fonte: Adaptado de WERNER e WANG, 2017.

3.2.3 Parametrizações físicas

Muitos dos processos atmosféricos ocorrem em escala menor que o espaçamento da grade dos modelos meteorológicos, não sendo possível a sua resolução de forma explícita. Devido ao limitado poder de processamento computacional disponível atualmente, a utilização de grades com escala de mesma ordem em que tais processos ocorrem é proibitiva. A parametrização física, portanto, pode ser entendida como uma representação de fenômenos de escala de sub-grade, sendo resolvidos, portanto, de forma implícita. Embora guiadas até certo ponto pela teoria, as parametrizações são, em grande parte, empíricas por natureza (STENSRUD, 2007).

Neste sentido, foram desenvolvidos diversos esquemas físicos para representação de fenômenos atmosféricos, com diferentes aproximações e graus de complexidade. As incertezas associadas a tais representações e sua subsequente influência na escala resolvida, porém, são uma fonte primária de erros de previsão (STENSRUD, 2007). Os processos físicos a serem parametrizados no WRF subdividem-se em seis: microfísica de nuvens, convecção de cumulus, camada limite planetária, camada superficial, modelo de superfície terrestre e radiação (de onda curta e de onda longa).

Os esquemas de parametrização de cumulus são responsáveis pelos efeitos de escala de sub-grade de nuvens convectivas e/ ou nuvens rasas, sendo aplicáveis somente em grades de menor resolução (acima de 10 km) (SKAMAROCK *et al.*, 2008). Destinam-se a representar fluxos verticais devido a correntes ascendentes (*updraft*) e descendentes (*downdraft*) não resolvidas

incluindo os processos de entranhamento e desentranhamento de ar saturado na nuvem, obtendo como resultado a parcela de precipitação relativa aos processos convectivos (SKAMAROCK *et al.*, 2008). A passagem de tais efeitos para variáveis de maior escala, que serão resolvidas explicitamente pelo modelo, se dá a partir da mudança da distribuição vertical do calor associado à condensação do vapor, do transporte de umidade dos baixos níveis para a alta atmosfera pelas correntes ascendentes e no saldo radiativo da atmosfera, modificado pela presença de nuvens convectivas (OLIVEIRA, 2014).

Os esquemas de microfísica de nuvens abordam diferentes interações entre os tipos de precipitações, sendo essenciais no aperfeiçoamento da previsão de chuva nos domínios de maior resolução (alguns poucos quilômetros) (SONG e SOHN, 2017). As opções de esquemas podem contemplar até seis classes de hidrometeoros: vapor d'água, água da nuvem, gelo da nuvem, chuva, neve e granizo/graupel (SKAMAROCK *et al.*, 2008). As interações entre elas incluem diversos processos tais como nucleação, coalescência, acreção, congelamento, precipitação, entre outros; e determinam as suas interconversões (surgimento ou consumo). As diferenças entre os esquemas de microfísica, portanto, residem nos tipos de hidrometeoros considerados e as interações entre eles.

Os esquemas de radiação calculam o aquecimento atmosférico devido ao fluxo de ondas curtas e ondas longas. A radiação de onda curta é proveniente do Sol, no entanto, os processos contabilizados incluem todos os fenômenos que ocorrem no sistema Terra-atmosfera, como a absorção, reflexão e dispersão (SKAMAROCK *et al.*, 2008). Desta forma, na maioria das opções de esquemas físicos, existe um fluxo ascendente de radiações de onda curta, devido ao albedo da superfície, bem como radiação de onda longa sendo emitida devido a esta interação. Esta última inclui radiação infravermelha ou térmica absorvida e emitida por gases e superfícies. O fluxo radiativo de onda longa ascendente do solo é determinado pela emissividade da superfície que, por sua vez, depende do tipo de uso do solo, bem como da temperatura da superfície do solo (ZHAO *et al.*, 2013). Dentro da atmosfera, a radiação também responde às distribuições de nuvem e vapor d'água previstas pelo modelo, bem como as concentrações de dióxido de carbono, ozônio e (opcionalmente) concentrações de gases traço e particulados (MOHANTY e GOPALAKRISHNAN, 2016).

Com relação aos modelos de camada superficial, estes são responsáveis por calcular a velocidades de fricção e coeficientes de troca que permitem a determinação dos fluxos de calor

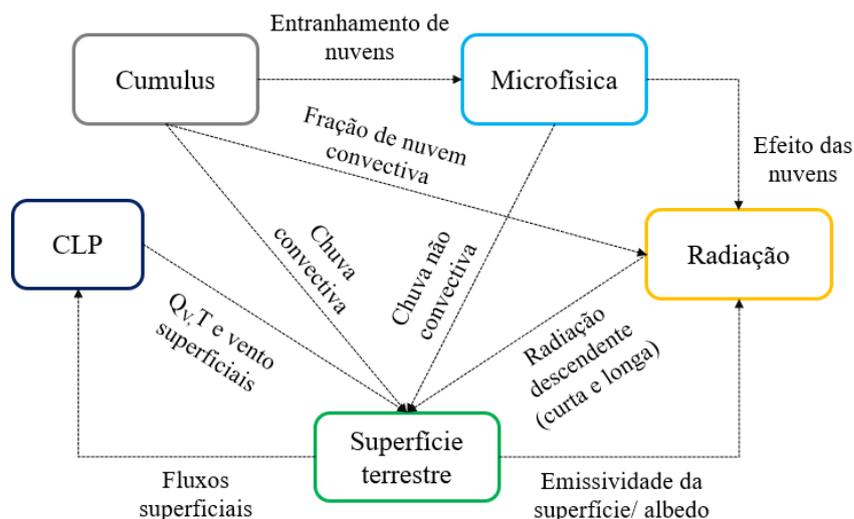
e umidade pelo modelo de superfície terrestre (SKAMAROCK *et al.*, 2008). A camada superficial é a porção mais baixa da atmosfera e na qual a geração de turbulência mecânica prevalece sobre a convectiva, sendo a primeira, portanto, a mais relevante nos processos de mistura (OKE *et al.*, 2017). Nesta camada, o atrito devido as forças de arraste, as trocas de calor por condução e a evaporação causam variações substanciais de velocidade, temperatura e umidade do vento com a altura, embora os fluxos turbulentos sejam, aproximadamente, constantes (STULL, 2011).

Como citado anteriormente, os modelos de superfície terrestre fazem uso de informações de outras categorias de parametrizações. As características da atmosfera são provenientes do esquema de camada superficial, as forçantes radiativas dos esquemas de radiação e as forçantes de precipitação dos esquemas de microfísica e convecção de cumulus. Em conjunto com variáveis de estado e características do solo, são calculados fluxos de calor e umidade sobre a terra e o mar, proporcionando o combustível para os processos atmosféricos na parte mais inferior da camada limite (SKAMAROCK *et al.*, 2008; LEE *et al.*, 2016). Os modelos de superfície terrestre consideram diferentes graus de complexidade ao calcular os fluxos de calor e massa, para os quais podem ser alterados o número de camadas do solo bem como adicionado o efeito de diferentes fenômenos produzidos pela vegetação, camada urbana, cobertura por neve, entre outros (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

Por fim, a função dos esquemas de CLP é a de representar os fluxos verticais ocasionados pelo transporte de turbilhões (SKAMAROCK *et al.*, 2008), a partir de informações fornecidas pelos esquemas de camada superficial e superfície terrestre. Estes turbilhões ocorrem em escala espaço-temporais que não podem ser explicitamente representadas na grade e no passo de tempo usualmente empregados nos modelos de mesoescala, sendo, por este motivo, parametrizadas por meio dos esquemas de CLP (COHEN *et al.*, 2015). Desta forma, torna-se possível a determinação da distribuição vertical de temperatura, umidade (incluindo nuvens) e momentum horizontal em toda a coluna atmosférica.

Os esquemas de parametrização são importantes porque influenciam consideravelmente as previsões e apesar de serem esquemas físicos modulares, estes interagem entre si de forma indireta, por meio de mudanças nas variáveis estimadas pelo modelo. Na Figura 8, é possível observar a relação entre os esquemas físicos do WRF.

Figura 8: Interação entre as parametrizações físicas do modelo WRF.



Fonte: Adaptado de DUDHIA, 2016.

Os processos de entranhamento/desentranhamento de nuvens convectivas parametrizadas pelos esquemas físicos de cumulus, por exemplo, afetam a distribuição de hidrometeoros previstas pelos modelos de microfísica, tendo impacto na predição das tendências locais (UWM, 2018). Por sua vez, o saldo de radiação é influenciado pela cobertura de nuvens, seja ela de origem convectiva ou não, em virtude da redução da radiação de onda curta incidente e irradiação de onda longa (UWM, 2018). O balanço radiativo também é influenciado pelas características da superfície, à medida em que a emissividade e o albedo das superfícies se modificam. O esquema de radiação também é responsável por interferir no balanço energético da superfície, simulado pelos modelos de superfície terrestre, quanto à fração de radiação descendente.

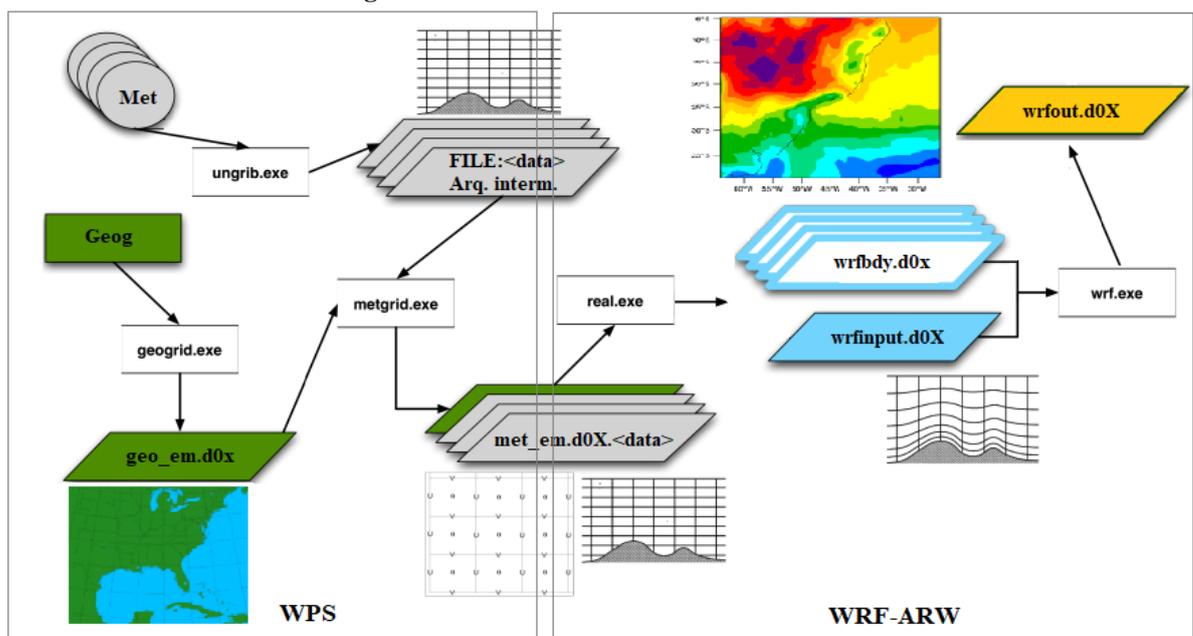
A precipitação convectiva e não-convectiva produzidas pelos esquemas de microfísica e cumulus, respectivamente, podem alterar o conteúdo de água no solo (UWM, 2018), modificando os fluxos superficiais de umidade e calor calculados pelos modelos de superfície terrestre, o que por sua vez influencia no transporte vertical estimado pelos esquemas de CLP. Como estes últimos são responsáveis pela distribuição vertical de calor, umidade e momentum horizontal em toda a coluna atmosférica, os parâmetros de temperatura, razão de mistura (Q_v) e vento superficiais, também podem ser influenciados pelos processos que ocorrem na superfície (SKAMAROCK *et al.*, 2018)

3.2.4 Fluxo de processamento

O WRF possui estrutura modular o que leva ao processamento de dados de forma segmentada e sequencial, permitindo a acoplagem de funções complementares. O fluxo de dados na versão

padrão do WRF segue o caminho indicado na Figura 9, sendo composto por um sistema de pré-processamento, denominado de *WRF Preprocessing System* (WPS) e um núcleo principal, o *Advanced Research WRF* (ARW). O WPS possui três programas independentes cujo papel principal é preparar os dados de entrada para as simulações: geogrid, ungrib e metgrid. No geogrid.exe são definidos os domínios da simulação e interpolados horizontalmente dados geográficos estáticos (indicados na figura como Geog) para todas as grades do domínio, como já mencionado. A saída do geogrid gera um arquivo geo_em.d0X para cada domínio. O ungrib.exe tem a função de transformar os campos meteorológicos de um modelo global (Met) no formato GriB (Gridded Binary) para um formato intermediário. Os arquivos gerados são nomeados como FILE:<data> e variam em número, sendo dependentes da quantidade de dias que serão modelados. Ambas as saídas dos programas citados previamente são, então, processadas pelo metgrid.exe, que tem a função de interpolar horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo ungrib nos domínios definidos. Já o núcleo principal é responsável pela modelagem propriamente dita (WRF-ARW). O programa real.exe, cria as condições iniciais e de contorno, além de interpolar os dados do modelo global de acordo com o número de camadas verticais definidas pelo usuário. Por fim, no wrf.exe são resolvidas numericamente equações diferenciais, gerando um arquivo de saída wrfout.d0X para cada domínio, nos quais estão salvas diversas variáveis como temperatura, velocidade do vento, pressão, entre outros, nas direções x, y e z.

Figura 9: Fluxo de trabalho do modelo WRF



Fonte: Adaptado de DUDHIA, 2012.

3.3 Representação da superfície terrestre

3.3.1 Abordagem padrão

As cidades são caracterizadas por propriedades físicas significativamente diferentes das suas contrapartes naturais, o que resulta na produção de regimes de escoamento específicos. Os efeitos produzidos pela superfície urbana nos fluxos turbulentos podem ser representados no modelo de mesoescala a partir de diferentes técnicas e parametrizações. A abordagem mais simples e uma das utilizadas é aquela realizada pelo Modelo de Superfície Terrestre Noah LSM (LIU *et al.*, 2006).

Neste modelo as áreas urbanas são tratadas da mesma forma que as áreas de vegetação. Assim, a camada urbana não é explicitamente parametrizada, ao invés disso, são modificados vários parâmetros descritivos das cidades, como o comprimento de rugosidade, albedo, condutividade térmica do solo, redução da fração vegetada e o aumento da capacidade de armazenamento de calor para reproduzir os efeitos urbanos (LEE *et al.*, 2011). Neste sentido, são atribuídos altos valores de capacidade térmica e baixíssimos valores para a fração de vegetação verde e índice de área foliar (LAI), resultando, em muitas das vezes, na supressão dos fluxos de calor latente e na superestimativa do calor sensível, e conseqüentemente, na intensidade da ilha de calor (LEE *et al.*, 2011). Além disso, todas as zonas urbanizadas são consideradas homogêneas e utilizam-se dos mesmos parâmetros (DE LA PAZ *et al.*, 2016).

Uma das principais funções dos modelos de superfície terrestre é a de calcular os fluxos de calor, que permitem que o balanço energético da superfície seja realizado. No esquema Noah LSM, os fluxos de calor sensível, calor latente e calor do solo, são calculados por meio das Eq. (6), (7) e (8), respectivamente (ANDERSON, 2013):

$$Q_E = \rho C_e |U_a| (q_s - q_a) \quad (6)$$

Em que: Q_E é o fluxo de calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); C_e é o coeficiente de transferência para a umidade; U_a é a velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); q_s é a umidade específica na superfície ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); e q_a é a umidade específica do ar no nível vertical mais baixo da atmosfera ou em alguma altura específica acima do solo ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

$$Q_H = \rho C_p C_h |U_a| (\theta_s - \theta_a) \quad (7)$$

Em que: Q_H é o fluxo de calor sensível (W.m^{-2}); ρ é a densidade do ar (kg.m^{-3}); C_p é a capacidade térmica do ar ($\text{J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$); C_h é o coeficiente de transferência de calor; U_a é a velocidade do vento (m.s^{-1}); θ_s é a temperatura potencial na superfície (K); e θ_a é a temperatura potencial no nível vertical mais baixo da atmosfera ou em alguma altura específica acima do solo (K).

$$Q_G = K_T(\theta) \left(\frac{T_{solo} - T_{sk}}{\Delta z} \right) \quad (8)$$

Em que: Q_G é o fluxo de calor do solo transferido por condução (W.m^{-2}); K_T é a condutividade térmica do solo ($\text{W.m}^{-1}. \text{K}^{-1}$); θ é o conteúdo de água no solo (%); T_{solo} é a temperatura do solo; T_{sk} é a temperatura na superfície (*skin temperature*) do solo; Δz é a distância entre a superfície e o centro da camada superior do solo (m).

O balanço energético da superfície pode ser calculado, então, pela soma das parcelas de calor latente, calor sensível e calor do solo. O quociente entre tais fluxos é conhecida como razão de Bowen (β). Se $\beta < 1$, a dissipação de energia como calor latente é mais favorecida, contribuindo para o controle da temperatura e a umidificação do ar (OKE *et al.*, 2017). Se $\beta > 1$, é verificado o comportamento contrário, uma maior produção de calor sensível é favorecida, aquecendo o ar da baixa atmosfera (OKE *et al.*, 2017). No modelo de superfície terrestre Noah LSM, a temperatura a 2m, relaciona-se com o fluxo de calor sensível conforme expresso na Eq. (9) (SALAMANCA *et al.*, 2018):

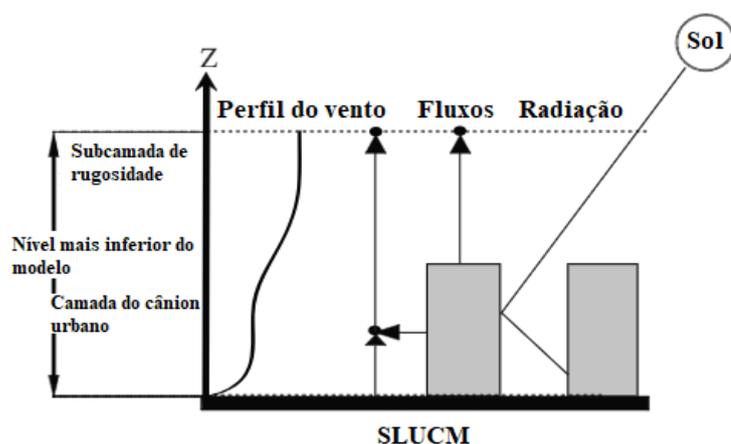
$$T_{2m} = T_{sk} - \frac{Q_H}{\rho c_p C_{H2}} \quad (9)$$

Em que: T_{2m} é a temperatura do ar a 2m (K); T_{sk} é a temperatura na superfície (*skin temperature*) do solo; Q_H é o fluxo de calor sensível (W.m^{-2}); ρ é a densidade do ar (kg.m^{-3}); c_p é o calor específico do ar ($\text{J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$); e C_{H2} é o coeficiente de troca para calor calculado a altura de 2m.

3.3.2 Building Effect Parameterization - BEP

Uma abordagem mais elaborada para a inserção dos efeitos produzidos pela ocupação urbana é a fornecida pelo modelo *Single-layer Urban Canopy Model* (SLUCM), desenvolvidos por Kusaka *et al.* (2001) e Kusaka e Kimura (2004). Nele são considerados cânions urbanos tridimensionais, os efeitos de sombreamento e aprisionamento da radiação, a interação do vento com as superfícies urbanas rugosas, o fluxo de calor produzido por atividades antropogênicas e fachadas de edifícios e um perfil exponencial para o vento, sendo as trocas de momento e energia realizadas somente dentro de uma única camada (CHEN *et al.*, 2011), como ilustrado na Figura 10. A orientação dos cânions porém não pode ser especificada e o primeiro nível vertical do modelo deve ser superior aos dos edifícios, limitando a capacidade de representação dos processos que ocorrem dentro da UCL (SARMIENTO *et al.*, 2017).

Figura 10: Representação dos processos físicos considerados pelo *Single-layer Urban Canopy Model* (SLUCM).



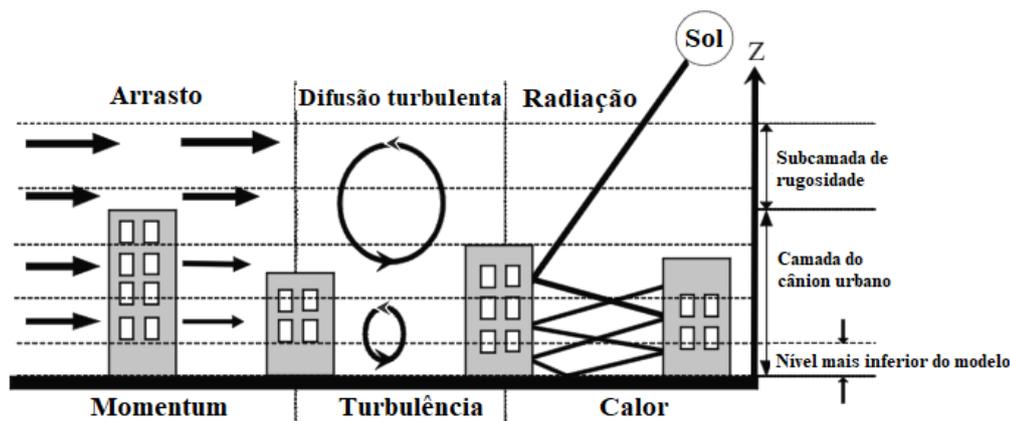
Fonte: Adaptado de CHEN *et al.*, 2011.

Nas condições reais, contudo, as fontes e sumidouros de calor, momentum e ECT não estão localizados somente na superfície, como considerado pelas duas abordagens mencionadas anteriormente, mas distribuídos verticalmente. Desenvolvido por Martilli *et al.* (2002), o modelo de cânion urbano *Building Effect Parameterization* (BEP) visa preencher tal lacuna apresentando formulações mais sofisticadas. Sua acoplagem ao modelo de mesoescala tem como objetivo representar os efeitos das construções no fluxo de ar, considerando o efeito das superfícies urbanas horizontais e verticais, desde o nível do solo até os edifícios mais altos, nas equações de momentum, calor e energia cinética turbulenta, sendo por este motivo classificado como um modelo multicamadas.

Os fenômenos adicionados pelo BEP à abordagem padrão, encontram-se descritos abaixo (MARTILLI *et al.*, 2002) e representados na Figura 11:

- Forças de arraste induzidas pelas paredes dos edifícios com a consequente perda de momentum;
- Forças de fricção associadas às superfícies horizontais (superfície e telhados), também atuando como sumidouro de momentum;
- Aumento da transformação da energia cinética média em energia cinética turbulenta devido à interação do fluxo de ar com os edifícios;
- O desenvolvimento da difusão acelerada, geradas por elementos de rugosidade que misturam e difundem o calor, momento, umidade e outros escalares, como os poluentes atmosféricos;
- Modificação dos fluxos de calor sensível devido ao aprisionamento de radiação de onda curta e onda longa nos cânions urbanos, e o armazenamento de calor nos edifícios;
- Aquecimento / resfriamento diferencial de superfícies iluminadas pelo sol / sombreadas.

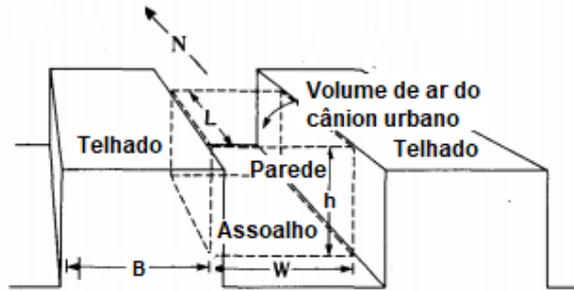
Figura 11: Representação dos processos físicos considerados pelo *Building Effect Parameterization* (BEP).



Fonte: Adaptado de CHEN *et al.*, 2011.

No BEP, os diferentes tipos de construções são representados de forma idealizada e por classes. Cada classe é caracterizada por um vetor de prédios com a mesma largura (B), separados uns dos outros por ruas de largura W , com diferentes alturas (com uma certa probabilidade γ (h) para ter um edifício com altura h) e orientações, como parcialmente ilustrado na Figura 12. Para simplificar, o comprimento das ruas tem o mesmo tamanho que o da célula horizontal da grade (MARTILLI *et al.*, 2002). A partir destes parâmetros é possível calcular as áreas horizontais (telhados e assoalho) e verticais (paredes) de cada superfície urbana em cada célula e seus respectivos efeitos nos fluxos turbulentos.

Figura 12: Representação do cânion urbano no modelo urbano do BEP.



Fonte: Adaptado de NUNEZ e OKE, 1977.

Considerando os fenômenos adicionados pelo BEP e visto como as áreas urbanas são representadas, é possível compreender com mais detalhes as modificações impostas pelo modelo. Inicialmente com relação aos fluxos turbulentos de momentum, tem-se que este contabiliza os efeitos das superfícies horizontais utilizando a teoria de similaridade de Monin-Obukhov, como é realizado na abordagem padrão, dado a ausência de uma formulação alternativa. A diferença é que ela é aplicada para cada nível configurado pelo usuário e dependente do comprimento de rugosidade da superfície (se telhado ou assoalho). Os edifícios também induzem forças de arraste, causadas pelas diferenças de pressão em elementos de rugosidade individuais, sendo estas ortogonais à direção do cânion da rua e com um componente contra a direção horizontal do vento, dado em determinado nível pelo modelo de mesoescala (MARTILLI *et al.*, 2002). Os equacionamentos relacionados às descrições supracitadas podem ser encontradas nas fórmulas (13) e (14) de Martilli *et al.* (2002).

Já para a consideração dos efeitos dos edifícios na modificação dos fluxos de calor sensível se faz necessária a determinação das diferenças de temperatura entre o ar e as superfícies urbanas. Assim, para o cálculo das temperaturas da superfície de telhados, paredes e assoalho, uma equação de difusão de calor é resolvida em vários níveis no material e um balanço de energia é calculado para cada superfície (MARTILLI *et al.*, 2002). A condição de contorno inferior para temperatura é fixa, o que significa que a temperatura no nível mais profundo dentro do material é constante durante todo o período de simulação, enquanto em sua superfície, a condição de contorno é definida pela solução do referido balanço energético (MARTILLI *et al.*, 2002). A mesma técnica é usada nas simulações com a abordagem tradicional no cálculo da temperatura da superfície em áreas urbanas. A diferença é que apenas uma temperatura é calculada (superfície do solo) e não são levados em consideração nem o efeito de aprisionamento da radiação nem o efeito de sombreamento.

Na Eq. (10), encontra-se um exemplo, para calor sensível, de como a contribuição de cada superfície urbana é considerada no cálculo das variáveis de interesse.

$$Q_{H-BEP} = f_{tel.} \times Q_{H-tel.} + f_{par.} \times Q_{H-par.} + f_{as.} \times Q_{H-as.} \quad (10)$$

Em que: Q_{H-BEP} é o fluxo de calor sensível referente à fração urbana calculada pelo BEP ($W.m^{-2}$); $f_{tel.}$, $f_{par.}$ e $f_{as.}$, são as frações do cânion urbano cobertas por telhados, paredes e assoalho, respectivamente; $Q_{H-tel.}$, $Q_{H-par.}$ e $Q_{H-as.}$ são os fluxos de calor sensível relativos exclusivamente aos telhados, paredes e assoalho, respectivamente.

Ainda com relação aos efeitos das construções no fluxo de ar, tem-se que nas áreas urbanas que a conversão da energia cinética média em energia cinética turbulenta é aumentada. Na abordagem clássica, no nível mais baixo do modelo, o impacto da superfície é levado em conta nos termos de produção cisalhante e flutuante de energia cinética turbulenta, usando os valores dos fluxos de superfície e a teoria de similaridade de Monin-Obukhov. No BEP, este aspecto é tratado de forma similar ao que ocorre na abordagem padrão, com a diferença de que os termos da equação são multiplicados por um volume de referência acima da superfície (MARTILLI *et al.*, 2002).

Além de fenômenos adicionais, a formulação do BEP também permite a representação da vegetação urbana, existindo, se assim determinado pelo usuário, uma fração coberta por superfícies impermeáveis (f_{urb}) e outra, coberta por vegetação ($1 - f_{urb}$) (SARMIENTO *et al.*, 2017). Assim, os fluxos relativos à fração urbana são computados pelo modelo de cânion urbano enquanto a fração vegetada é tratada pelo modelo de superfície terrestre. O fluxo total em escala de grade, então, é dado pela soma destas duas parcelas. Na Eq.(11), é mostrado o cálculo do fluxo de calor sensível, como exemplo (CHEN *et al.*, 2011). Os fluxos de calor latente, radiação de onda longa ascendente, albedo, emissividade e temperatura superficial do solo para uma dada célula de grade também são estimados da mesma maneira (CHEN *et al.*, 2011).

$$Q_H = f_{urb} \times Q_{H-BEP} + (1 - f_{urb}) \times Q_{H-LSM} \quad (11)$$

Em que: Q_H é o fluxo de calor sensível total em uma célula de grade para o nível vertical mais baixo do modelo; f_{urb} é fração de cobertura de superfícies impermeáveis, como edifícios e estradas; Q_{H-BEP} é o fluxo de calor sensível calculado pelo BEP para as superfícies

impermeáveis; Q_{H-LSM} é fluxo de calor sensível calculado pelo modelo de superfície terrestre para as superfícies vegetadas.

Devido à representação mais complexa da geometria da cidade e a distribuição dos fluxos em camadas, alguns estudos têm constatado uma tendência de melhor desempenho do BEP em detrimento ao SLUCM. Iriza *et al.* (2017), em um estudo de modelagem da formação de ilhas de calor para a cidade de Bucareste, Romênia, testaram o desempenho do WRF em três condições: sem parametrização urbana, com SLUCM e com o BEP. Verificou-se que a integração com o esquema mais simplificado não trouxe melhorias significativas para a previsão da ICU na cidade, enquanto o modelo multicamadas foi capaz de estimar melhor não somente a distribuição espacial e temporal das ilhas, mas também a intensidade do fenômeno.

A utilização do BEP mostra-se promissora, ainda, para um melhor desempenho dos modelos de qualidade do ar como *Community Multi-scale Air Quality Model* (CMAQ). De La Paz *et al.* (2016) testaram o BEP acoplado ao WRF para a cidade de Madri, na Espanha, e observaram que a introdução do módulo BEP foi capaz de melhorar significativamente a predição da velocidade do vento em relação às áreas construídas, com um viés anual médio de $-0,3 \text{ m.s}^{-1}$ em comparação com os $1,6 \text{ m.s}^{-1}$ obtidos pelo WRF sem a parametrização urbana. Como resultado, o CMAQ foi capaz de reproduzir melhor as concentrações medidas de O_3 e $\text{MP}_{2,5}$ no nível do solo.

Além de estimativas mais precisas dos parâmetros meteorológicos, a acoplagem do BEP ao modelo de mesoescala permite a condução de diversos estudos no âmbito do planejamento urbano. Hamdi e Schayes (2008) em estudo para a cidade de Basileia, Suíça, analisaram as diferenças produzidas na mitigação da ICU de uma simulação controle a partir de modificações no fator de visão do céu, aumento da fração vegetada e alterações nas propriedades dos materiais constituintes de vias, telhados e paredes dos edifícios. Entre as principais constatações estão a obtenção de uma relação linear ($R^2 = 0,99$) entre a magnitude da ilha de calor noturna e fator de visão de céu; a redução na temperatura diurna e um aumento no fluxo de calor latente de 66 W.m^{-2} para 196 W.m^{-2} , após a modificação da fração vegetada de 16% para 50%; e a intensificação da ilha de calor noturna, após um aumento na capacidade térmica das superfícies urbanas (telhado, paredes e vias).

Os ganhos oferecidos pelos modelos de cânion urbano, no entanto, dependem de uma boa representação das cidades e de seus elementos. Porém, a inicialização do módulo com o

preenchimento das informações necessárias com os chamados parâmetros do cânion urbano ou *urban canopy parameters* (UCP) tem sido um desafio atualmente, dado a escassa disponibilidade de dados e a metodologia para mapeamento em fina escala (CHEN *et al.*, 2011). Idealmente, tais parâmetros devem se basear em observações reais, mas quando em sua ausência, devem ser incorporados de estudos empíricos e de modelagem. No próximo tópico serão discutidas as abordagens alternativas que visam suprir tal demanda.

3.4 Dados de entrada para inicialização do BEP e a classificação LCZ

São diversos os parâmetros do cânion urbano necessários à inicialização do módulo do BEP, como aspectos da morfologia de vias, paredes e telhados e propriedade térmicas e radiativas de materiais. Tais dados podem ser obtidos de campanhas experimentais e/ou derivados diretamente de imagens de satélite com auxílio de técnicas de Sensoriamento Remoto e de ferramentas dos Sistemas de Informação Geográfica.

O projeto METROMEX (*Metropolitan Meteorological Experiment*) realizado na cidade americana de Saint Louis no ano de 1971, por exemplo, foi um dos pioneiros no monitoramento dos efeitos das cidades no clima, com foco na mudança dos padrões de precipitação (CHANGNON JUNIOR *et al.*, 1971). Foram investigados os padrões de vento e de formação de nuvens, além do balanço energético da cidade. À medida que o clima urbano foi ganhando destaque, os estudos e as técnicas de monitoramento foram avançando.

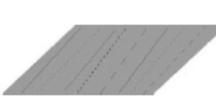
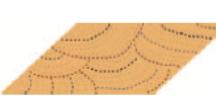
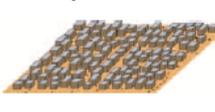
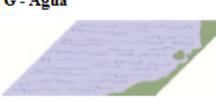
O projeto BUBBLE (*Basel Urban Boundary Layer Experiment*), conduzido na cidade da Basileia, na Suíça, já no ano de 2001, contou com uma longa campanha de coleta de dados experimentais medidos em superfície e remotamente por sensores do tipo LIDAR (*Light Detection And Ranging*), modelagem numérica e estudos em túnel de vento. Investigou-se os fluxos turbulentos de calor, umidade e momentum na UBL, não somente no intuito de prever melhor as condições de dispersão nas cidades, mas também de atuar como laboratório para o embasamento da formulação de teorias futuras que esclareçam o complexo escoamento do ar nos ambientes urbanos (CHRISTEN, 2005). Outros projetos similares ao BUBBLE são o DESIREX 2008 (*Dual-use European Security IR Experiment*), realizado na cidade de Madrid/Espanha, o THERMOPOLIS 2009, desenvolvido em Atenas/Grécia e o NUDAPT (*National Urban Database and Access Portal Tool*), um banco de dados que reúne informações de 44 cidades dos Estados Unidos (CHING *et al.*, 2014).

Observa-se que a coleta de dados em um ambiente tão complexo e heterogêneo quanto as cidades, é um processo dispendioso que demanda significativos recursos financeiros e humanos, vide o projeto BUBBLE que contou com o investimento de diferentes países para que pudesse ser concluído (ROTACH, 2002). Como tal esforço não é comum em grande parte das cidades, principalmente, aquelas localizadas em países em desenvolvimento, os estudos que requerem parâmetros do cânion urbano podem ser estimados baseando-se em valores teóricos ou experimentais de ocupações similares. Neste sentido, uma das metodologias disponíveis é a classificação das cidades em zonas climáticas locais (*Local Climate Zones - LCZ*). Tal classificação foi proposta por Stewart e Oke (2009) originalmente com o intuito de padronizar os estudos climáticos urbanos em todo o mundo, principalmente aqueles relacionados às ilhas de calor, associando a morfologia de tais áreas às suas propriedades climáticas correspondentes.

As LCZ representam uma descrição genérica do uso e ocupação do solo, livre de fatores culturais e de fácil compreensão. Existem dezessete tipos de LCZ, como pode ser observado na Figura 13, incluindo dez tipos construídos (LCZ 1-10) e sete tipos de cobertura de solo (LCZ A-G). Os tipos de LCZ podem ser identificados a partir de expedições a campo ou usando diferentes dados de observação da Terra, incluindo dados ópticos e térmicos imageados por satélite, bem como dados de radar (STEWART e OKE, 2012; BECHTEL *et al.*, 2015).

A escolha de tal classificação para suportar os parâmetros necessários aos estudos climáticos é justificada pelo fato de que os processos que dão origem aos efeitos climáticos urbanos podem ser relacionados aos aspectos de sua forma e função (BROUSSE *et al.*, 2016). A forma urbana descreve aspectos da cobertura da superfície (por exemplo, a fração impermeável), os materiais de construção utilizados (como as suas características térmicas e radiativas) e a morfologia tridimensional (altura das edificações, largura de vias e orientação), enquanto a função está relacionada às atividades que são desenvolvidas nas cidades (OKE *et al.*, 2017).

Figura 13: Descrição das classes das zonas climáticas locais.

Tipos construídos	Definição	Tipos de cobertura do solo	Definição
1 - Arranha-céus compactos 	Densa mistura de prédios altos com dezenas de andares. Poucas árvores ou nenhuma. Materiais de construção: concreto, aço, pedra e vidro.	A - Árvores densas 	Paisagem de árvores de madeira densa, decíduas e/ou perenes. A cobertura do solo é principalmente permeável (plantas baixas). Função da zona: floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
2 - Edifícios médios compactos 	Densa mistura de prédios médios (3 – 9 andares). Poucas árvores ou nenhuma. Cobertura do solo basicamente pavimentada. Materiais de construção: pedra, tijolo, telha e concreto.	B - Árvores dispersas 	Paisagem de árvores de madeira leve, decíduas e/ou perenes. A cobertura da terra é principalmente permeável (plantas baixas). Função da zona: floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
3 - Edifícios baixos compactos 	Densa mistura de construções baixas (1 – 3 andares). Poucas árvores ou nenhuma. Materiais de construção: pedra, tijolo, telha e concreto.	C - Arbustos, matagal 	Arranjo aberto de arbustos e árvores baixas e lenhosas. A cobertura do solo é principalmente permeável (solo nu ou areia). Função da zona: arvoredo natural ou agricultura.
4 - Arranha-céus abertos 	Arranjo aberto de prédios altos com dezenas de andares. Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores esparsas). Materiais de construção: concreto, aço, pedra e vidro.	D - Plantas baixas 	Paisagem com grama ou plantas/culturas herbáceas sem traços característicos. Poucas árvores ou nenhuma. Função da zona: pastagem natural, agricultura ou parque urbano.
5 - Edifícios médios abertos 	Arranjo aberto de prédios médios (3 – 9 andares). Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores esparsas). Materiais de construção: concreto, aço, pedra e vidro.	E - Rocha nua ou pavimento 	Paisagem com rochas sem traços característicos ou cobertura pavimentada. Poucas árvores e plantas ou nenhuma. Função da zona: deserto natural (rocha) ou transporte urbano.
6 - Construções baixas abertas 	Arranjo aberto de prédios baixos (1 – 3 andares). Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores esparsas). Materiais de construção: madeira, tijolo, pedra, telha e concreto.	F - Solo nu ou areia 	Paisagem coberta por solo ou areia sem traços característicos. Poucas árvores e plantas ou nenhuma. Função da zona: deserto natural ou agricultura natural.
7 - Construções leves e baixas 	Densa mistura de construções de um andar. Poucas árvores ou nenhuma. Cobertura principalmente de solo compactado. Materiais de construção leves (por exemplo: madeira, palha, metal corrugado).	G - Água 	Amplos corpos d'água como mares e lagos, ou pequenos, como rios, reservatórios e lagoas.
8 - Construções amplas e baixas 	Arranjo aberto de prédios grandes e baixos (1 – 3 andares). Poucas árvores ou nenhuma. Materiais de construção: aço, concreto, metal e pedra.	Propriedades variáveis da cobertura do solo	
9 - Construções espaçadas 	Arranjo espaçado de construções pequenas e médias em paisagens naturais. Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores esparsas).	b. árvores descobertas	Árvores decíduas sem folhas (inverno). Aumento do fator de visão do céu. Reduzido albedo.
10 - Indústria pesada 	Estruturas industriais pequenas e médias (torres, depósitos, chaminés). Cobertura principalmente de solo compactado ou pavimentado. Materiais de construção: metal, aço e concreto.	s. cobertura de neve	Cobertura > 10 cm de profundidade. Baixa admitância. Elevado albedo.
		d. solo seco	Solo ressecado. Baixa admitância. Alta razão de Bowen. Elevado albedo.
		w. solo úmido	Solo encharcado. Alta admitância. Baixa razão de Bowen. Reduzido albedo.

Fonte: Adaptado de STEWART e OKE, 2012.

As propriedades de cada classe LCZ podem ser diferenciadas por dez propriedades quantificáveis relacionadas à estrutura da superfície (fator de visão do céu, razão de aspecto, altura do elemento de rugosidade), cobertura da superfície (fração do plano ocupada por edifícios, vegetação e solo impermeável), tecido superficial (admitância térmica, albedo superficial) e atividade humana (produção de calor antropogênico) (BECHTEL *et al.*, 2015). Os dados para caracterização de cada LCZ foram baseados em formulações empíricas, estudos de modelagem numérica e de campanhas em campo (STEWART e OKE, 2012). As tabelas constando informações sobre os valores geométricos e de superfície das LCZ, bem como as suas propriedades térmicas, radiativas e metabólicas encontram-se descritas em Stewart e Oke (2012).

A utilização das LCZ como fonte de parâmetros do cânion urbano em estudos meteorológicos, porém, é somente parcial. Apesar de possibilitar o agrupamento e a simplificação do tecido urbano em classes e o fornecimento de uma faixa de valores requisitados pelos modelos de cânion urbano, ainda é necessária a adoção de dados empíricos ou experimentais de cidades com ocupação similar aos da área em estudo. A adequabilidade das LCZ na descrição das cidades bem como a sua aplicação na inicialização dos modelos urbanos, apesar de algumas limitações, tem se mostrado promissora.

Em um trabalho para a cidade de Madri, Brousse *et al.* (2016), visando checar a capacidade de representação das áreas urbanas pelas LCZ, comparam tal classificação com a fornecida pelo CORINE, banco de dados de uso do solo europeu que classifica as áreas urbanas em três tipos (Tecido Urbano Contínuo, Tecido Urbano Descontínuo e Outras Áreas Urbanas). Foram realizadas simulações meteorológicas com o WRF acoplados a modelo de cânion urbano e verificados, por meio do cálculos de índices estatísticos, a acurácia na predição da temperatura. Verificou-se que houve melhoria de até 10% quando utilizada a classificação LCZ, além de uma melhor distinção entre locais com diferentes características de urbanização, dado o maior número de classes (dez) desta em comparação ao CORINE (três).

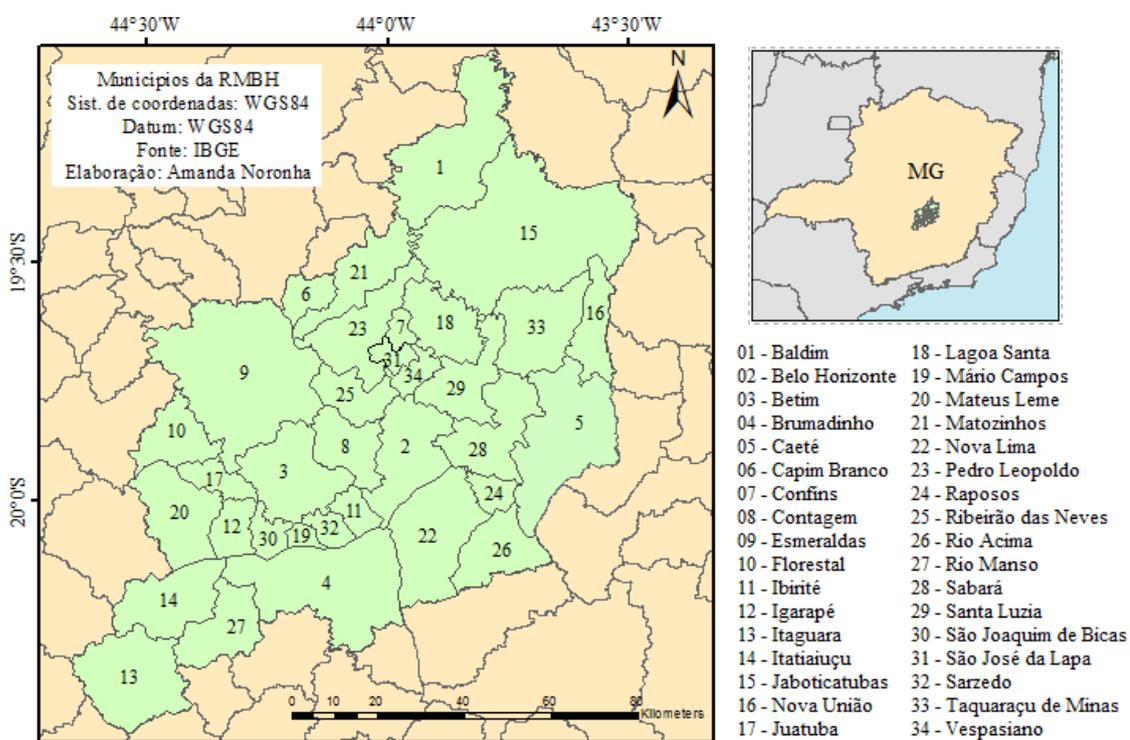
Quanto à utilização das propriedades das LCZ na inicialização de módulos urbanos, Hammerberg *et al.* (2018) verificaram para a cidade de Viena, na Áustria, somente um aumento marginal na performance do modelo WRF urbano quando utilizados parâmetros morfométricos (distribuição de altura, fração urbana e razão H/W) calculados por ferramentas de GIS em comparação àqueles com base nas faixas propostas por Stewart e Oke (2012).

3.5 Caracterização da área de estudo

3.5.1 Aspectos gerais da RMBH

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), composta por 34 municípios (Figura 14), está localizada na parte central do estado de Minas Gerais, entre as latitudes sul 19°03'14" e 20°29'10" e as longitudes oeste 44°39'33" e 43°28'48", cobrindo uma área de 9.460 km² (IBGE, 2017). A RMBH é o centro político e econômico de Minas Gerais, apresentando no ano de 2016 um Produto Interno Bruto (PIB) de, aproximadamente, R\$ 175,8 bilhões, dos quais cerca de 50,2 % pertenciam à cidade de Belo Horizonte (IBGE, 2016b). Atualmente, a capital Belo Horizonte é a 6ª maior cidade do Brasil com 2,5 milhões de habitantes (IBGE, 2018a), e a 3ª maior região metropolitana do Brasil com 5,8 milhões de habitantes (IBGE, 2016a), ambas em termos populacionais. A densidade demográfica média da RMBH, segundo os dados do Censo 2010, é de 648 hab./km², porém com grande disparidade entre as áreas, apresentando desde índices de 11,5 hab./km² (Taquaraçu de Minas) a 7167,0 hab./km² (Belo Horizonte) (IBGE, 2010).

Figura 14: Municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte.



Fundada em 1897, a cidade de Belo Horizonte (BH) foi criada para ser a capital do estado de Minas Gerais. Seu núcleo central, delimitado pela Avenida do Contorno, foi planejado como um espaço moderno e reservado para as elites mineiras, com avenidas ortogonais largas bem arborizadas e com infraestrutura sanitária (OLIVEIRA, 2004). Fora dos limites da avenida estavam a região suburbana, com moradias e serviços precários, e a zona rural, onde se localizariam núcleos responsáveis por abastecer a capital (OLIVEIRA, 2004). O projeto urbanístico de Belo Horizonte à época rendeu-lhe o título de “cidade jardim”, dada a abundante presença de vegetação na paisagem. Até a década de 1920, a ocupação se restringia a algumas áreas no núcleo urbano e áreas periféricas ao norte, pela população de baixa renda (MACEDO e UMBELINO, 2016).

Com a criação do polo industrial mineiro (Cidade Industrial), na década de 1930, a cidade se expandiu em direção ao sentido oeste (MACEDO e UMBELINO, 2016) e posteriormente, entre 1935 - 1950, na direção norte-sul. O processo de verticalização do centro da cidade, iniciou-se na década de 1950, se estendendo também às outras áreas da capital alguns anos mais tarde. Estima-se que em 1964, Belo Horizonte já possuía cerca de um milhão de habitantes e 50 mil carros em circulação (DUARTE, 2007). A partir da década de 1990 em diante, a área central bem como os bairros nobres da regional Centro-Sul passaram por um acelerado processo de verticalização.

Nos dias de hoje tal tendência de expansão ainda se mantém, dando origem a um vetor de crescimento em direção à cidade de Nova Lima, com ocupações de alto padrão (ASSIS, 2010). No setor Norte, com o crescimento da regional de Venda Nova e a criação da Cidade Administrativa de Minas Gerais, verificou-se também a conurbação com outros municípios, principalmente, Ribeirão das Neves e Vespasiano (ASSIS, 2010).

Apesar de Belo Horizonte ser uma cidade jovem (121 anos em 2017) quando comparada à São Paulo (464 anos) e Rio de Janeiro (453 anos)(IBGE, 2018b), os processos acelerados de urbanização e industrialização, foram responsáveis por alterar drasticamente a paisagem, a partir da redução de áreas verdes, aumento da impermeabilização do solo e adensamento de construções, além da progressiva emissão de poluentes pelas atividades industriais e pela frota veicular. Assis (2010), em um estudo da evolução do clima na região desde a implantação da cidade até 2010, relatou um aumento de 2°C na temperatura média compensada, além de uma tendência de redução na umidade relativa do ar de 73,2% (1911 - 1928) para 72,2% (1961 –

1990), mostrando a influência do uso e ocupação do solo na alteração dos parâmetros meteorológicos.

3.5.2 Características climáticas

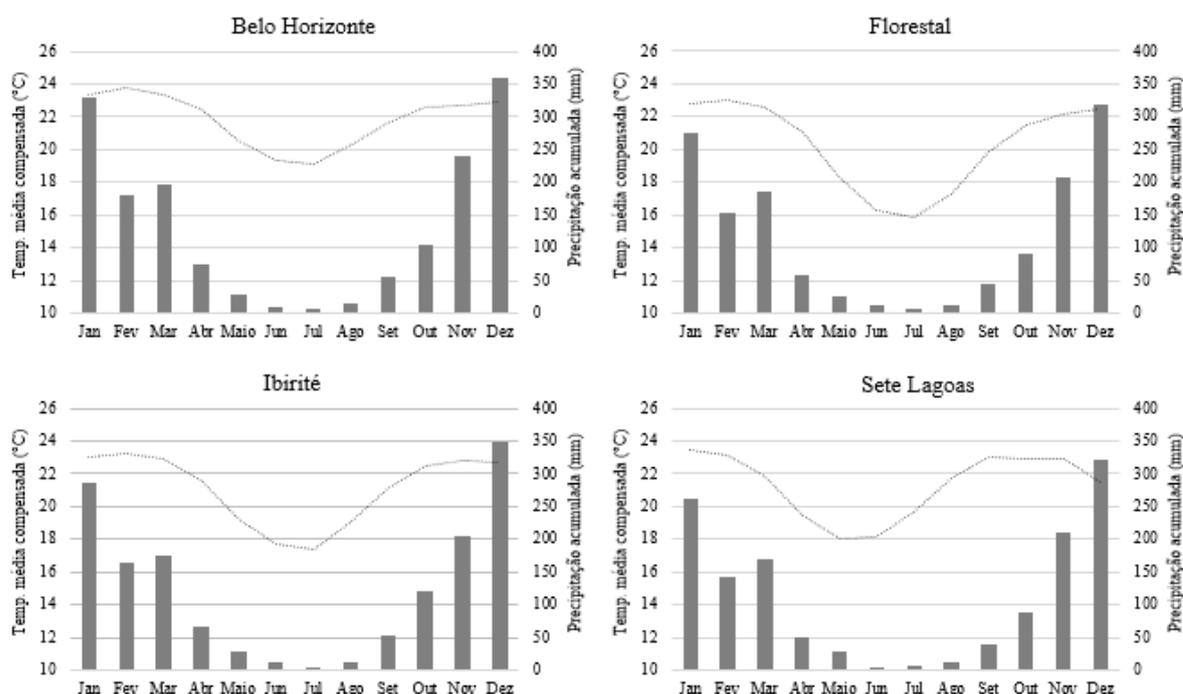
O clima na região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresenta dois subtipos, Cwa - clima temperado úmido com inverno seco e verão quente e Cwb - clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado (NUNES *et al.*, 2015). O primeiro é predominante nas áreas serranas, como as porções a leste compreendidas pelo complexo da Serra do Espinhaço, e o segundo, nas áreas de menor altitude.

Os climas da RMBH caracterizam-se pela existência de uma estação seca e outra chuvosa. A primeira, que tem início em outubro e estende-se até março, é resultado da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Nesta estação do ano, os ventos alísios tornam-se mais intensos e carregam muita umidade para a Amazônia. Juntamente com a evapotranspiração da floresta, tal umidade é transportada para o Sul e o Sudeste do Brasil, por uma corrente de ventos, conhecida como Jatos de Baixos Níveis (JBN). Além da umidade recebida por este setor, a região Sudeste também conta com a umidade que é transportada pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que nessa época do ano encontra-se deslocado para leste, favorecendo o transporte da umidade do oceano para o continente. A configuração desta condição, juntamente com outros fatores meteorológicos, formam a ZCAS, caracterizada por uma faixa de nebulosidade que se estende desde a Amazônia ao sudoeste do Oceano Atlântico, cobrindo, portanto o Sudeste do Brasil (REBOITA *et al.*, 2015). Tais sistemas estão associados a elevados totais de precipitação, justificando o verão úmido dos climas Cwa e Cwb predominantes na RMBH.

Com a aproximação do inverno austral, os sistemas atmosféricos migram para o norte, causando o deslocamento do ASAS para oeste e a alocação de parte de seu setor sobre o Sudeste e Sul do Brasil. Tal configuração dificulta os movimentos ascendentes do ar e a propagação de sistemas frontais, ambos atuando no sentido de impedir a formação de nuvens, resultando em condições de céu claro sobre Minas Gerais durante a estação seca, que começa em abril e estende-se até setembro (REBOITA *et al.*, 2015). Essas condições de estabilidade também influenciam negativamente a qualidade do ar, desfavorecendo a dispersão de poluentes nos centros urbanos.

Na Figura 15 é possível observar as normais climatológicas (1981 – 2010) de precipitação mensal acumulada para todas as estações meteorológicas localizadas na RMBH, bem como a temperatura média compensada. Como citado anteriormente, é possível verificar a concentração de chuvas nos meses entre outubro e março, associadas a temperaturas mais elevadas. Observa-se que entre as estações, aquela em que foi registrado os maiores índices pluviométricos foi a localizada na cidade de Belo Horizonte (1603 mm/ano), seguida por Ibirité (1485 mm/ano), Florestal (1393 mm/ano) e Sete Lagoas (1335 mm/ano), sendo os meses de dezembro e janeiro os principais contribuintes. Com relação a temperatura, observa-se que a estação de Belo Horizonte foi a que registrou os maiores valores médios mensais, atingindo em fevereiro a marca de 24°C. Verifica-se, ainda, que a estação de Florestal é a que apresenta maior amplitude térmica entre os meses de verão e inverno, seguida pela estação de Ibirité, com diferenças máximas de 7°C e 6°C, respectivamente.

Figura 15: Normais climatológicas (1981 - 2010) de temperatura média compensada (°C) e precipitação acumulada mensal (mm) para a RMBH.



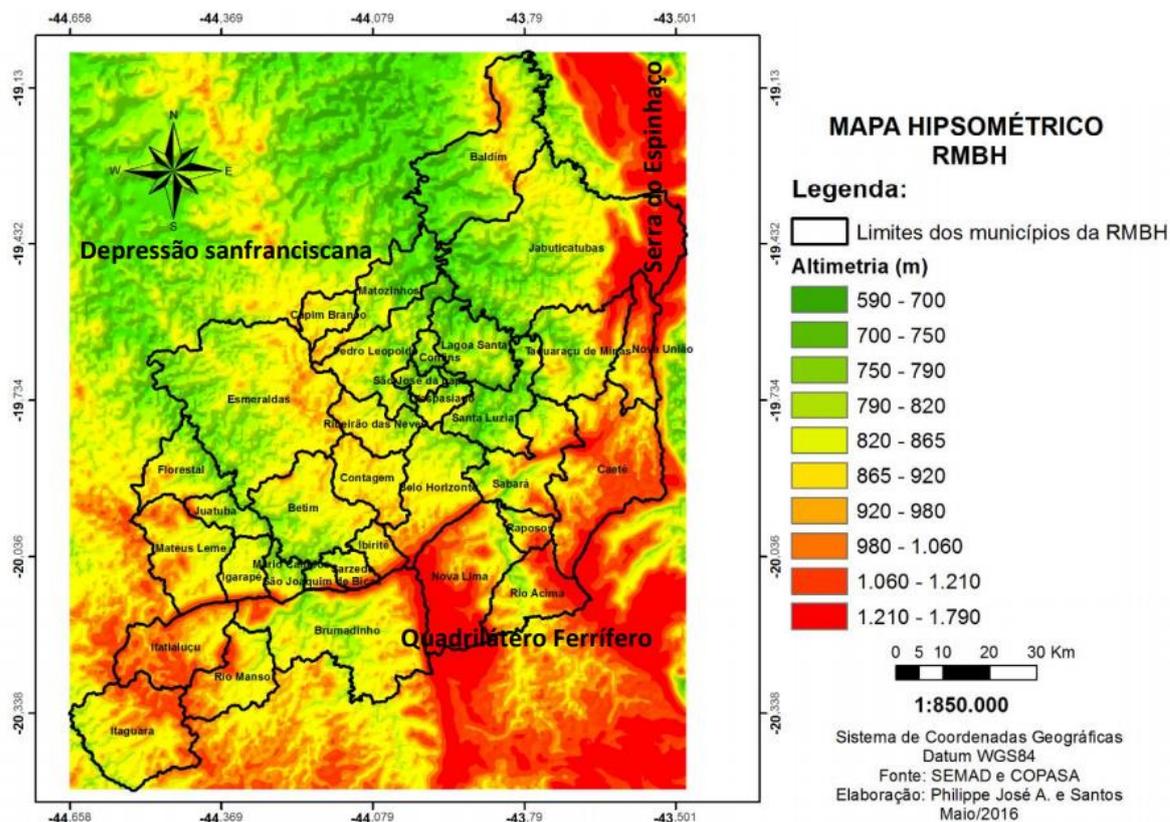
Fonte: INMET, 2018.

3.5.3 Topografia

O Sudeste brasileiro apresenta nítida influência da altimetria e posicionamento do relevo no condicionamento do clima (distribuição espacial das chuvas e temperatura) (REBOITA *et al.*, 2012). Áreas com maior altitude apresentam menores temperaturas quando comparadas com

aquelas mais próximas ao nível do mar. Na RMBH, os campos do vento e da temperatura mostram significativa relação com o relevo. É possível observar na Figura 16, as diferenças altimétricas entre as unidades geomorfológicas do Quadrilátero Ferrífero e da Depressão Sanfranciscana.

Figura 16: Mapa hipsométrico da RMBH.



Fonte: SANTOS, 2016.

Ao sul da capital, delimitando o Quadrilátero Ferrífero, encontra-se a Serra do Curral que integra o maciço do complexo da Serra do Espinhaço. Com alinhamento de direção nordeste-sudoeste, 47 km de extensão e altitudes que variam entre 1100 m a 1500 m, a Serra do Curral estabelece uma barreira natural à expansão da mancha urbana e à passagem de massas de ar (OLIVEIRA *et al.*, 2011; BELO HORIZONTE, 1995). Em contrapartida, a noroeste tem-se regiões mais deprimidas, com altitudes partindo de 590 m. Assis (2010) em um estudo sobre o clima urbano de Belo Horizonte, constatou que, em geral, os bairros localizados mais próximos da Serra do Curral apresentaram médias térmicas menores que os bairros inseridos em áreas mais baixas, como os das regionais Venda Nova e Pampulha.

3.6 Estudos desenvolvidos na RMBH no âmbito do clima urbano

Os principais trabalhos desenvolvidos para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, no âmbito do clima urbano, encontram-se listados na Tabela 1. Foram selecionados aqueles estudos desenvolvidos nos últimos dez anos e de relevância para a temática da influência da urbanização nas condições meteorológicas. Foram observados os seus objetivos centrais, a área de estudo, a escala espacial contemplada e a origem do dado para a realização da análise, se medido ou proveniente de modelagem. Um breve resumo de cada um será realizado a seguir.

Tabela 1: Estudos recentes envolvendo a análise do clima urbano da RMBH.

Tema	Referência	Área de estudo	Escala espacial	Origem do dado
Impacto da urbanização na temperatura e umidade superficiais	Vilela <i>et al.</i> (2009)	B. Belvedere III – Belo Horizonte	Microescala	Dados observados e modelados
Mapeamento de unidades climáticas naturais e urbanas	Assis (2010)	Belo Horizonte	Local	Dados observados
Influência das estruturas urbanas no clima local	Francisco (2012)	B. Planalto – Belo Horizonte	Microescala	Dados observados e modelados
Simulações de vento e aplicações no planejamento urbano	Ferreira e Assis (2015)	Belo Horizonte	Local	Dados modelados
Verificação da dimensão temporal das transformações no clima	Jardim e Silva (2016)	Belo Horizonte e Ibirité	Local	Dados observados
Construção de mapa climático analítico	Ferreira <i>et al.</i> (2017)	Belo Horizonte	Local	Dados observados

A fim de conhecer a evolução do clima belorizontino ao longo dos anos, Assis (2010) resgatou dados de estações meteorológicas desde o início do século XX para mapear as unidades climáticas naturais e coletou dados meteorológicos em diversos pontos da cidade para definir as atuais características do clima urbano. Foram verificadas alterações na temperatura e umidade da série histórica dos dados meteorológicos ao longo do tempo e a detecção de ilhas de calor nos locais mais adensados e impermeabilizados do município. O estudo concluiu que, depois da altitude e do relevo, o atual uso e ocupação do solo é o principal controlador climático em Belo Horizonte, determinando de forma significativa as características topo e mesoclimáticas encontradas.

Francisco (2012), em um trabalho bastante local para o Bairro Planalto, situado na região norte de Belo Horizonte, simulou por meio do programa ENVI-Met, o impacto da verticalização do bairro e a substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por gramíneas. Tal software é um modelo microclimático tridimensional projetado para simular as interações

entre a superfície urbanizada e a atmosfera. Foi constatado que a umidade relativa do ar e a temperatura apresentaram comportamentos diferentes dependendo do período do dia, para o cenário de verticalização. Durante o dia, a substituição da atual ocupação resultou na redução da temperatura do ar e aumento da umidade, em função do sombreamento causados por edifícios mais altos, enquanto durante a noite, o padrão inverso foi verificado. Já a simulação com o cenário hipotético de substituição da vegetação chegou a produzir um aumento de até 2,6°C na temperatura do ar do parque e 1,5°C na área urbana, indicando a importância da manutenção das áreas verdes no controle e prevenção dos efeitos adversos do clima urbano.

A influência da urbanização no fluxo de vento também foi examinada. Para tal objetivo, Ferreira e Assis (2015) fizeram uso de um modelo físico de terreno em túnel de vento e do programa WindMap. Os resultados produzidos por ambas as ferramentas foram semelhantes. A partir deste estudo foi possível identificar o valor médio da velocidade do ar na cidade e as áreas com má ventilação. As manchas de velocidade de vento correspondentes ao intervalo de 2 - 2,5 m/s cobriram praticamente todo o território de Belo Horizonte, principalmente nas regiões norte e central, em que a topografia é menos acidentada, o que favorece o escoamento do ar. Já na região Sul, foi verificada condições desfavoráveis de ventilação, o que pode ser atribuído à presença do conjunto de montanhas da Serra do Curral. Os resultados foram comparados ainda à atual Lei de Uso e Ocupação do Solo do município. Na avaliação do zoneamento disposto na referida lei, constatou-se que várias áreas onde o adensamento e a verticalização são permitidos e/ou incentivados correspondem a regiões de baixas velocidades dos ventos, contribuindo negativamente para as condições de ventilação da cidade.

Com o objetivo de verificar se a ocorrência de extremos de temperatura nos municípios de Belo Horizonte e Ibirité é fruto de uma mudança natural do clima ou dos efeitos antrópicos, Jardim e Silva (2016) avaliaram dados meteorológicos para o período de 1961-2014. Foram verificadas altas temperaturas na capital desde 1963, com valores variando entre 35,0 e 37,1 °C. Algumas das hipóteses levantadas, a princípio, para justificar a ocorrência de tais máximas foram: (1) as altas temperaturas são resultantes de eventos naturais, de ocorrência típica na latitude de Belo Horizonte; (2) influência crescente do clima urbano, decorrente do crescimento da população e da industrialização; e (3) combinação de ambos os processos. Após a aplicação de técnicas de estatísticas descritiva e análise de tendência e correlação, concluiu-se que com a metodologia proposta não foi possível definir precisamente qual é o efeito da ocupação urbana na ocorrência de extremos de temperaturas, existindo somente um apontamento de sua contribuição. Sabe-se,

porém, que tais eventos estão embutidos em um contexto climático maior, com a atuação de fenômenos de maior escala como o *El Niño* e máximos de atividade solar.

Ferreira *et al.* (2017) desenvolveram um estudo similar ao de Assis (2010), com o objetivo de criar bases para a formulação de recomendações para o planejamento urbano da cidade. Foram reunidos dados de uso do solo, aspectos geográficos e informações sobre os ventos para a produção de mapas temáticos para Belo Horizonte, combinados, posteriormente, para a geração de um mapa climático urbano analítico. Foram geradas oito classes climáticas urbanas, diferentes entre si pela carga térmica e o potencial dinâmico (mede a disponibilidade do vento e a capacidade de atenuação da carga térmica). No geral, observou-se que, aproximadamente, metade da área da cidade ainda apresenta baixo potencial para armazenamento de calor e boas condições dinâmicas, indicando que o impacto dos elementos urbanos nas condições climáticas ainda pode ser considerado baixo.

Após breve resumo dos trabalhos mais recentes e relevantes que tratam da influência da ocupação urbana no clima, foi verificado que, em suma, estes tendem a se concentrar em Belo Horizonte ou em bairros desta, devido a maior disponibilidade de dados, estudando as mudanças nas variáveis meteorológicas na superfície, sendo a temperatura, umidade e fluxo de vento os principais parâmetros abordados. Os dados usados nas análises, em sua maioria, são provenientes de observações realizadas em estações ou abrigos meteorológicos, sendo menos comum o uso de modelagem nas avaliações. Assim, tem-se diagnósticos restritos à pequena escala, aos níveis superficiais da atmosfera, às condições passadas ou atuais de ocupação, com possibilidade de obtenção de resultados inconclusivos.

Uma limitação das experiências de campo é que elas não podem ser repetidas sob as mesmas condições, não sendo possível isolar o objeto de estudo de influências externas como é possível na modelagem meteorológica (MÖLDERS, 2012). Os processos nestes modelos numéricos, como WRF a ser usado nesta pesquisa, podem ser ativados ou desativados, permitindo a experimentação com a atmosfera. Desta forma, parâmetros relativos a cobertura do solo podem ser trocados facilmente, preservando-se as mesmas condições iniciais e de contorno. A diferença entre os cenários estudados então, são em função da mudança de um item em específico.

Como o clima urbano é resultado da associação de diversos fatores, como o arranjo espacial das edificações, liberação de calor antropogênico, condições sinóticas, entre outros, a

modelagem numérica é uma ferramenta muito apropriada para o estudo das interações entre superfície e atmosfera. Ademais, os modelos de mesoescala permitem o conhecimento das condições atmosféricas não somente na superfície, mas em diferentes níveis verticais da camada limite planetária, podendo ser utilizado na análise de áreas extensas e na realização de prognósticos para cenários futuros. Os dados de saída encontram-se, ainda, em formatos facilmente trabalháveis por outros modelos, como os de qualidade do ar.

Cabe ressaltar, porém, que assim como os trabalhos de campo, os modelos também têm suas limitações, como a resolução temporal e espacial dos dados de entrada, a adoção de diversas simplificações, a necessidade de validação dos resultados e a demanda computacional. Idealmente, dada a complexidade da temática, quando possível, deve-se pensar na aplicação conjunta de ambas as abordagens.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho foi dividida em diferentes tópicos. Inicialmente, foi escolhido o período de estudo. Posteriormente, foi realizada a classificação da RMBH de forma compatível com os estudos do clima urbano (classificação LCZ), levando-se em consideração o período de estudo selecionado. Em seguida, as configurações do WRF foram ajustadas para a realização da modelagem meteorológica padrão e urbana (utilizando o BEP), que utilizou como dado de entrada o uso e ocupação do solo gerado pela classificação LCZ. A partir das simulações de melhor desempenho foram propostos procedimentos que permitiram a análise das diferenças provocadas pela ativação do módulo urbano do BEP, a avaliação de mudanças provocadas nas condições meteorológicas locais da RMBH a partir de cenário de expansão da mancha urbana e a realização de análise de sensibilidade do modelo de dossel urbano.

4.1 *Definição do período de estudo*

Os critérios para seleção do período de estudo se basearam na análise de dados meteorológicos do ano de 2017 para a identificação de episódios típicos e homogêneos característicos de cada estação para uma melhor representação pelo modelo meteorológico. Desta forma, evitaram-se períodos com a passagem de frentes frias, nos quais se tem mudanças importantes nas condições do tempo, com variações na pressão atmosférica, mudança na direção do vento, precipitação e temperatura (PETTERSEN, 1956). As simulações para ambas as validações foram realizadas para um período de cinco dias.

Para que a influência das áreas urbanas nas condições meteorológicas possam ser percebidas as condições atmosféricas em escala sinótica devem ser favoráveis. O clima urbano está sobre controle dos eventos de grande escala, como a passagem de frentes frias e zonas de convergência, sendo diluído por estes quando presentes fenômenos que provocam a mistura a atmosfera. Desta forma, para que as características da superfície governem os fluxos de momentum, calor e massa, são necessárias condições estáveis, como aquelas que se desenvolvem na estação seca. Neste período, de abril a setembro, como já discutido anteriormente, a atmosfera tem reduzida capacidade convectiva devido a atuação do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, criando circunstâncias ideais para a análise do clima urbano que se manifestam sob condições de céu claro, ausência de precipitação, elevadas temperaturas e baixo teor de umidade relativa (GEMIACKI, 2014; ASSIS, 2010). Desta forma, foram analisados os dados meteorológicos de cinco estações de superfície automáticas do Instituto

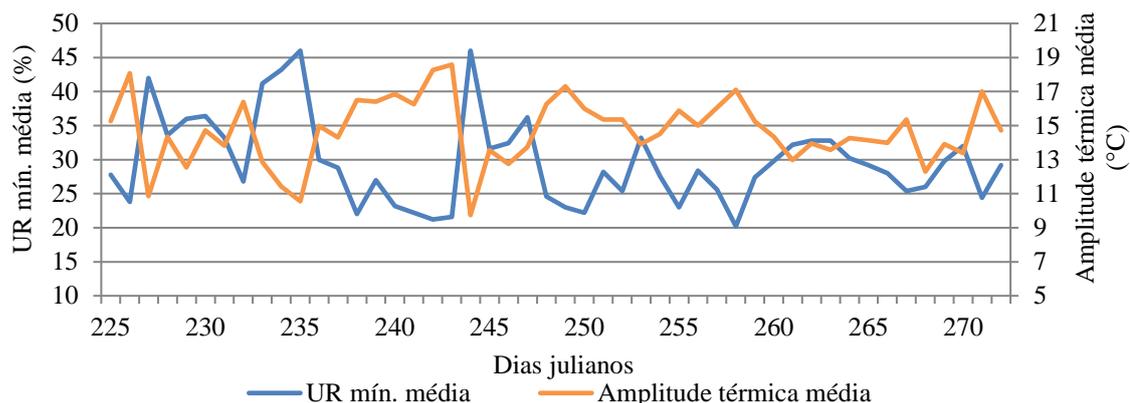
Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas na RMBH, de forma a identificar um período com as características descritas. Na Tabela 2, pode-se observar um resumo da precipitação acumulada para cada estação meteorológica na região durante o ano de 2017.

Tabela 2: Precipitação mensal acumulada nas estações meteorológicas automáticas do INMET, presentes na RMBH.

Mês	Cercadinho	Sete Lagoas	Ibirité (Rola Moça)	Florestal	Pampulha	Precipitação média (mm)
jan/17	113,8	119,2	168,0	168,8	179,6	149,9
fev/17	186,4	128,6	163,8	137,6	164,4	156,2
mar/17	152,8	97,4	158,0	148,8	88,6	129,1
abr/17	88,0	15,6	36,4	33,2	29,4	40,5
mai/17	15,2	27,8	22,8	36,6	28,0	26,1
jun/17	21,6	9,6	34,2	25,4	24,8	23,1
jul/17	0,2	0,2	0	0	0	0,1
ago/17	0,2	0	0	0	0	0,0
set/17	35,6	4,2	21,4	17,4	34,2	22,6
out/17	170,2	57,4	124,4	115,4	130,0	119,5
nov/17	157,2	178,6	198,8	151,4	203,0	177,8
dez/17	296,6	183,6	282,4	175,0	311,0	249,7
Total	1237,8	822,2	1210,2	1009,6	1193,0	1049,6

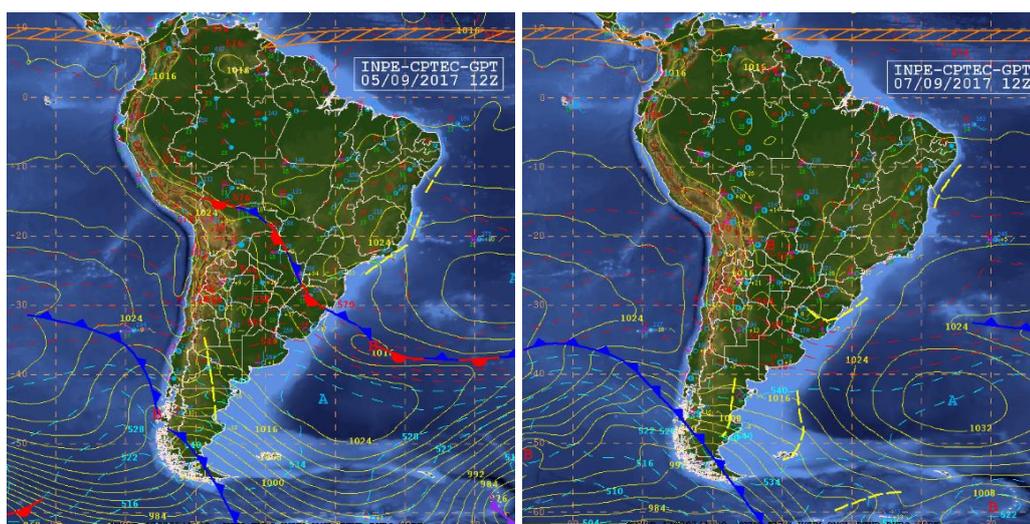
Para selecionar um período típico da estação seca foi considerado, inicialmente, um intervalo sem precipitação. Nos meses de julho e agosto, praticamente, não houve chuva, porém o maior período de dias secos consecutivos ocorreu em setembro. Tal período teve início em 13 de agosto (225º dia) e se encerrou em 29 de setembro (272º dia), com um total de 48 dias sem precipitação. Dentro deste intervalo foi pesquisado aquele com características homogêneas de amplitude térmica e de umidade relativa mínima. Tais parâmetros meteorológicos foram escolhidos porque são representativos do período seco, em que existe grande amplitude térmica, devido ao rápido resfriamento da terra à noite causado pela ausência de nuvens e baixa umidade relativa, devido à ausência de chuvas ocasionada pela atuação da ASAS. Verifica-se na Figura 17, que o período de maior homogeneidade quanto à amplitude térmica e umidade relativa mínima (UR mín.) são referentes às datas de 04 (247º dia) a 16 de setembro (259º dia). Desta forma, escolheu-se para o período para simulação de 05 dias, o intervalo de 05 a 09 de setembro.

Figura 17: Dados de umidade relativa mínima média e amplitude térmica média para o período com o maior número de dias sem precipitação.



As condições de estabilidade atmosféricas foram confirmadas a partir da análise das cartas sinóticas dos dias 05 a 09 de setembro, disponíveis no endereço eletrônico do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Assim, foi observado se houve a passagem de sistemas frontais sobre a região de estudo, uma vez que estes interferem significativamente nos parâmetros meteorológicos e na habilidade de previsão do modelo. Na Figura 18 encontram-se, exemplificados, as condições atmosféricas dos dias 05 e 07 de setembro para o horário de 09h. Verifica-se um centro de alta pressão (A) com valor de 1024 hPa a leste da região Sudeste, associado a Alta Subtropical do Atlântico Sul. A situação de estabilidade provocada pela atuação da ASAS também se repetiu nos demais dias, bem como a ausência de frentes frias, frentes quentes e linhas de instabilidade sobre o estado de Minas Gerais.

Figura 18: Cartas sinóticas dos dias 05 e 07 de setembro de 2017, para o horário local de 09h.



Fonte: INPE, 2017.

4.2 Classificação LCZ

4.2.1 Metodologia WUDAPT

O projeto *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) foi criado com o intuito de preencher a lacuna de descrições detalhadas da paisagem urbana (em diferentes níveis de detalhe). O objetivo do WUDAPT é produzir um banco de dados global de alta resolução que capture informações sobre a forma e a função urbana, e fornecer essa informação de forma adequada à ciência climática. A primeira fase do WUDAPT estabeleceu um protocolo usando o sistema de classificação das Zonas Climáticas Locais para dividir a paisagem urbana das cidades em tipos de vizinhança que podem informar a seleção de parâmetros em aplicações de modelo (BROUSSE *et al.*, 2016). Tal procedimento consiste, basicamente, em duas etapas: a delimitação da região de interesse e a classificação supervisionada.

4.2.1.1 Delimitação da área

A delimitação da região de interesse (ROI) sobre a RMBH levou em consideração tanto os critérios definidos pela metodologia para a classificação em LCZ quanto os indicados para a determinação dos domínios para o modelo meteorológico. Para o primeiro caso é recomendado que o polígono sobre a área possua extensões superiores a 50 km em ambas as direções e exista uma zona de buffer de 20 km de coordenadas de interesse. Já a recomendação para modelo WRF é que os domínios utilizados para alocação geográfica não apresente grades com extensões menores que 100 km (WERNER e WANG, 2017). Tendo em vista que cenários futuros de urbanização seriam simulados e as grades propostas mantidas, foram realizadas algumas tentativas de posicionamento da região de interesse sobre a RMBH utilizando o software QGIS, de forma a atender os critérios mencionados. Assim, definiu-se que a classificação seria realizada para uma área de 130 x 130 km, delimitada por um polígono centralizado em coordenada geográfica com -19.832° de latitude e -44.173° de longitude. Dentro de tal área será alocado o domínio de menor espaçamento de grade do modelo (D03).

4.2.1.2 Classificação supervisionada

A classificação da RMBH em zonas climáticas locais foi baseada no tutorial disponibilizado no *website* da iniciativa do WUDAPT para o nível 0, de menor detalhe. A metodologia proposta pelo projeto é baseada no já consolidado método de classificação supervisionada do campo de estudo do Sensoriamento Remoto. A classificação supervisionada é uma técnica de

identificação de áreas espectralmente semelhantes em imagem de satélite, na qual o usuário utiliza seu conhecimento prévio da região de interesse para escolher amostras de treinamento, cabendo ao algoritmo escolhido extrapolar as características espectrais destas áreas escolhidas para as outras regiões da imagem, realizando assim a classificação (CASTILLEJO-GONZÁLEZ *et al.*, 2009).

O primeiro passo para a classificação, portanto, foi a escolha das imagens do satélite Landsat8 OLI/TIRS C1 Level-1 necessárias ao fornecimento das informações espectrais. A plataforma Landsat8 opera com dois instrumentos, o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), fornecendo imagens orientadas ao norte verdadeiro na Projeção/Datum WGS1984 UTM Zone 23 N com dimensões aproximadas de 170 km (norte-sul) por 183 km (leste-oeste). Como podem ser observadas na Tabela 3, para o sensor multiespectral OLI são oito bandas com resolução espacial de 30 metros (bandas de 1 a 7 e 9) e uma banda pancromática (banda 8) com resolução espacial de 15 metros, e duas faixas térmicas (bandas 10 e 11) pertencentes ao sensor TIRS, coletadas na resolução de 100 m e reamostradas para 30 m nos produtos oferecidos. Para a classificação das imagens em zonas climáticas locais, foram usadas as bandas do instrumento TIRS e do OLI, com exceção das bandas 1, 8 e 9. Tais dados foram excluídos da classificação por não serem relevantes na provisão de informações úteis à classificação.

Tabela 3: Características espectrais dos sensores OLI e TIRS do Landsat8.

Bandas do Landsat 8	Comprimento de onda (m)	Resolução espacial (m)
Banda 1 – Aerossol costeiro	0,433 – 0,453	30
Banda 2 – Azul	0,450 – 0,515	30
Banda 3 – Verde	0,525 – 0,600	30
Banda 4 – Vermelho	0,630 – 0,680	30
Banda 5 – Infravermelho próximo	0,845 – 0,885	30
Banda 6 – Infravermelho de ondas curtas 1	1,560 – 1,660	30
Banda 7 – Infravermelho de ondas curtas 2	2,100 – 2,300	30
Banda 8 – Pancromática	0,500 – 0,680	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Infravermelho térmico 1	10,9 ⁽¹⁾	100
Banda 11 – Infravermelho térmico 2	12 ⁽¹⁾	100

(1) - Comprimento de onda central

Fonte: REUTER *et al.*, 2015; BARSÍ *et al.*, 2014.

As imagens foram baixadas gratuitamente no website do *United States Geological Survey* (USGS), segundo dois critérios: cobertura de nuvens menor que 10%; e tomadas durante o período diurno. Assim, dentre as imagens disponíveis para o ano de 2017, foram escolhidas aquelas que possuíam a menor cobertura de nuvens sobre a região de interesse. Como a RMBH se encontrava próxima à borda da imagem do satélite, foi necessário a realização de um mosaico com duas imagens do Landsat8 no software do QGIS. Na Figura 19 é possível observar a mancha urbana da RMBH localizada próxima aos limites da primeira imagem (a), a segunda imagem usada para completar a região de interesse (b) e o mosaico de ambas (c). A aquisição das imagens pelo satélite foi realizado no dia 18 setembro de 2016. Para o ano de 2017 não foram encontradas imagens adequadas para o estudo, uma vez que existia a cobertura de nuvens sobre a área de interesse. A composição natural das imagens delimitadas pelo ROI encontra-se na Figura 20.

Figura 19: Duas cenas da banda 4 do Landsat8 cobrindo a RMBH sobrepostas (a)(b) e o mosaico de ambas. (c).

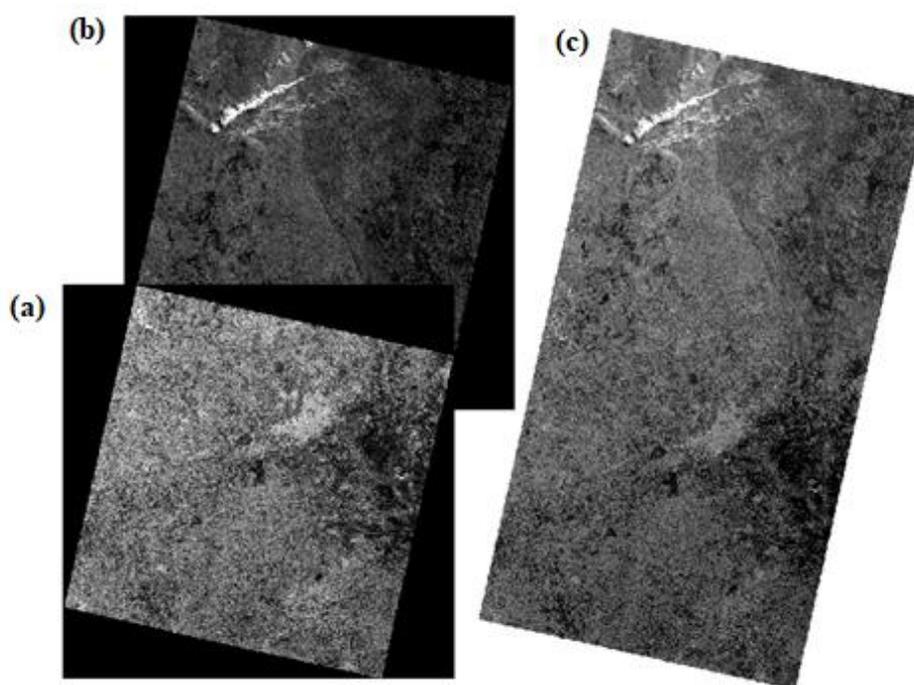


Figura 20: Composição natural do Landsat8 com a mancha urbana ao centro, delimitados pelo ROI de 130 km x 130 km de extensão.



Para a seleção das amostras de treinamento, exportou-se o polígono delimitador da região de interesse em formato .kml para o software do Google Earth e selecionou-se as áreas de acordo com a descrição de Stewart e Oke (2012). Na seleção das amostras de treinamento foram observadas as diversas recomendações da metodologia do WUDAPT, a saber:

- digitalizar somente áreas maiores que 1 km² e com, no mínimo, 200 m na dimensão mais estreita;
- selecionar várias áreas (na faixa de 5 a 15 amostras) por LCZ, contemplando a variância intraclasse;
- conservar um buffer de 100 m entre LCZs;
- preferir a digitalização de áreas persistentes ao longo do tempo, evitando, portanto locais em construção ou áreas cultivadas;
- evitar áreas muito complexas com reentrâncias e pontas;
- evitar a seleção de áreas perto das bordas de um tipo LCZ, uma vez que os pixels de satélite são susceptíveis de cair no limite da área de treinamento e receber um sinal misto como resultado, afetando negativamente a classificação;
- manter a acurácia geométrica na seleção;
- usar a opção do Google Street View para confirmação dos tipos de áreas urbanas;

Não foi padronizado um número mínimo ou máximo de áreas de treinamento a serem digitalizadas. A RMBH foi analisada trecho a trecho e foram selecionadas áreas suficientes para incluir a variância intraclasse. Para a LCZ 3, por exemplo, observou-se diferenças entre BH e cidades da região metropolitana. As últimas são caracterizadas por uma maior presença de

vegetação e um maior espaçamento entre construções. Apesar disso, foram incluídas na mesma classe. Zonas mais extensas, portanto, tiveram mais áreas digitalizadas e zonas pouco representativas, um menor número de amostras. Aquelas classes que apresentaram área menor do que 1 km² ou que não permitiam a seleção de, no mínimo, 3 amostras foram consideradas como não existentes.

Para cada LCZ foram selecionados o seguinte número de áreas de treinamento: LCZ1 – 5 amostras, LCZ 2 – 4 amostras, LCZ 3 – 14 amostras, LCZ 4 e LCZ 5 – sem representantes, LCZ 6 – 17 amostras, LCZ 7 – sem representantes, LCZ 8 – 8 amostras, LCZ 9 – 9 amostras, LCZ 10 – sem representantes, LCZ A – 9 amostras, LCZ B – 9 amostras, LCZ C – 6 amostras, LCZ D – 6 amostras, LCZ E – 5 amostras, LCZ F – 7 amostras, LCZ G – 5 amostras. Nas Figura 21 e Figura 22, são ilustradas amostras representativas de cada LCZ presentes na RMBH. As imagens foram adquiridas do software Google Earth e tomadas a, aproximadamente, 500 m de altura de visão.

Figura 21: Exemplos de classes urbanas da LCZ na RMBH: a) LCZ 1 no bairro Santo Agostinho/BH, b) LCZ 2 no bairro Gutierrez/BH, c) LCZ 3 na região de Venda Nova/BH, d) LCZ 6 no bairro Suzana/Florestal, e) LCZ 8 no bairro Cidade Industrial I/Contagem, f) LCZ 9 na cidade de Esmeraldas.

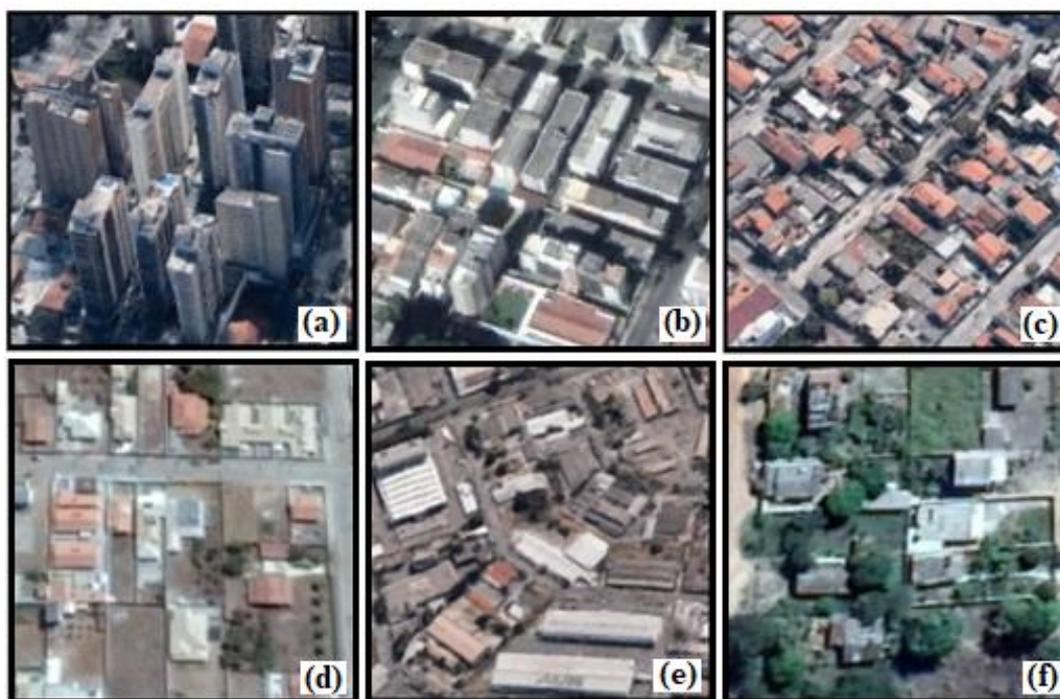
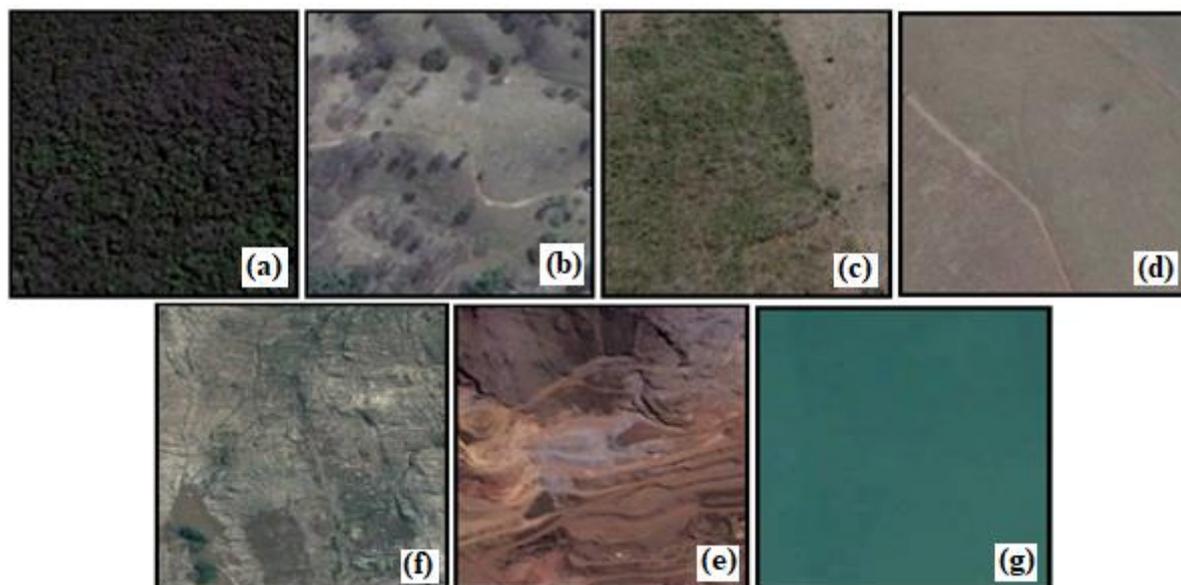


Figura 22: Exemplos de classes naturais da LCZ na RMBH: a) LCZ A no Reservatório Serra Azul/Igarapé, b) LCZ B próxima ao distrito de São Sebastião das Águas Claras/ Nova Lima, c) LCZ C próxima à cidade de Dr. Campolina, d) LCZ D próxima à cidade de Fidalgo, e) LCZ E próxima à cidade de Cardeal Mota, f) LCZ F próxima à cidade de Itatiaçu, g) LCZ G próxima à cidade de Ribeiros.

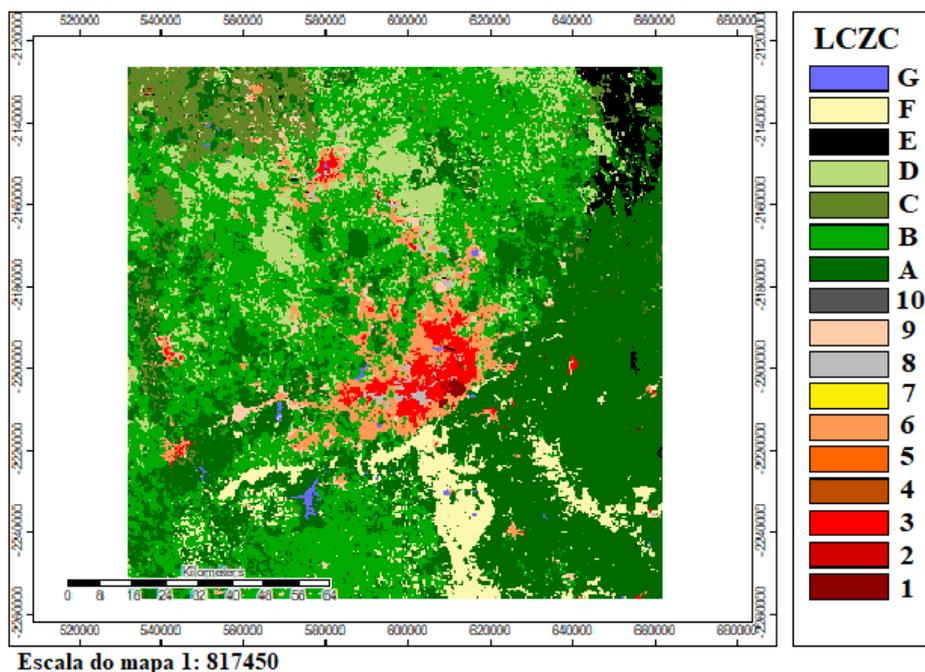


A classificação supervisionada foi realizada no software *System for Automated Geoscientific Analysis* (SAGA), após a importação do polígono ROI, das zonas de treinamento e das imagens de satélite, que foram reamostradas para 100 m. Para a classificação, somente as bandas que continham informações relevantes foram mantidas, desta forma excluiu-se as bandas para detecção de cirrus, a de correção atmosférica e a pancromática. O classificador padrão da metodologia é o *Random Forest* (RF) com 32 árvores de decisão. Tal algoritmo é baseado na técnica de aprendizagem de máquina, em que são geradas árvores de decisão para amostras randomicamente selecionadas, as quais são submetidas a testes que as classificam gerando ramificações, como galhos de uma árvore, até obtenção de um resultado, também chamado de folha, que fornecerá a classificação do dado (RODRIGUEZ-GALIANO *et al.*, 2012). O processo é repetido para diferentes conjuntos de amostras e para diferentes combinações dos canais da imagem do Landsat 8 (RODRIGUEZ-GALIANO *et al.*, 2012; MILLARD e RICHARDSON, 2015). A classificação final será a classe que recebeu o maior número de votos entre todas as árvores de decisão da floresta. As regras de classificação formuladas na etapa de treinamento serão, então, aplicadas na classificação dos demais pixels da área.

Foram geradas duas imagens com as classificações, em uma das quais foi aplicado um filtro da maioria. O filtro tem o objetivo de uniformizar o uso do solo levando em consideração a informação da vizinhança e gerando paisagens menos fragmentadas. A imagem filtrada foi

exportada para o Google Earth para conferência visual da acurácia da classificação. Observou-se que algumas áreas foram classificadas incorretamente e foi necessário o ajuste de algumas áreas de treinamento, quanto a área selecionada, a acurácia geométrica da seleção e mudança de algumas amostras de classe. Este procedimento foi repetido até que foi observada uma classificação satisfatória. A metodologia do WUDAPT prevê a necessidade destes acertos, tornando essa uma classificação que deve ser realizada de modo iterativo. O resultado final da imagem com filtro, que será usada nas simulações meteorológicas, é mostrado na Figura 23.

Figura 23: : Classificação LCZ da Região Metropolitana de Belo Horizonte.



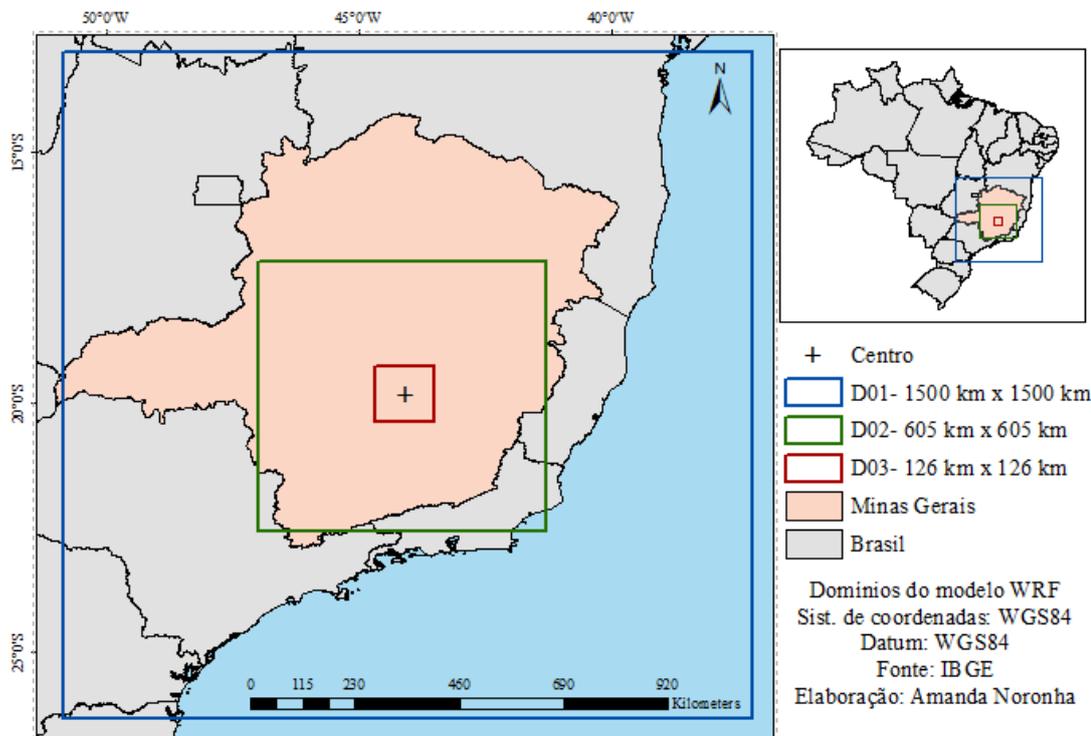
Avaliando-se o histograma da classificação acima fornecido pelo SAGA, observou-se que as paisagens urbanas recobrem 8,99 % da superfície do polígono ROI, segundo as seguintes subdivisões: 0,14% como arranha-céus compactos (LCZ 1), 0,05% como edifícios médios compactos (LCZ 2), 1,88% como edifícios baixos compactos (LCZ 3), 4,83% como construções baixas abertas (LCZ 6), 0,45% como construções amplas e baixas (LCZ 8), 1,65% como construções espaçadas (LCZ 9). Já as classes naturais, apresentaram os seguintes resultados: 36,37% como árvores densas (LCZ A), 33,83% como árvores dispersas (LCZ B), 4,71% como arbustos e matagal (LCZ C), 8,24% como plantas baixas (LCZ D), 2,22% como rocha nua ou pavimento (LCZ E), 5,36% como solo nu ou areia (LCZ F) e 0,28% como água (LCZ G). As classes não citadas não apresentaram amostras suficientes para seleção ou não foram encontradas na região classificada.

4.3 Modelagem meteorológica

4.3.1 Configurações do modelo WRF

Todas as simulações meteorológicas foram realizadas utilizando o modelo *Weather Research and Forecasting* v.3.9.1.1 nas modalidades padrão e urbana³, para o período de estudo definido anteriormente (05 – 09/09/2017), aplicando-se os domínios aninhados mostrados na Figura 24 e caracterizados na Tabela 4. O domínio-mãe D01, mais externo, com 1500 km de extensão em ambos os lados, possui espaçamento de grade de 25 km e encontra-se centrado na coordenada 19,83°S, 44,17°W. Compreendendo todo o estado de Minas Gerais, destina-se a receber fenômenos de escala sinótica e padrões gerais de circulação, além do fornecimento de dados relativos às condições de contorno para cada hora de simulação para o domínio D02. O domínio intermediário D02 possui 605 km de extensão em cada lado e espaçamento de grade de 5 km, enquanto o domínio mais interno D03 possui 126 km de extensão e 1 km de espaçamento de grade. Foi adotada a configuração de aninhamento de grades para o amortecimento das condições iniciais e de borda na área de interesse (D03), além da necessidade de redução do tempo de simulação.

Figura 24: Aninhamento dos domínios utilizados nas simulações com o modelo meteorológico WRF.



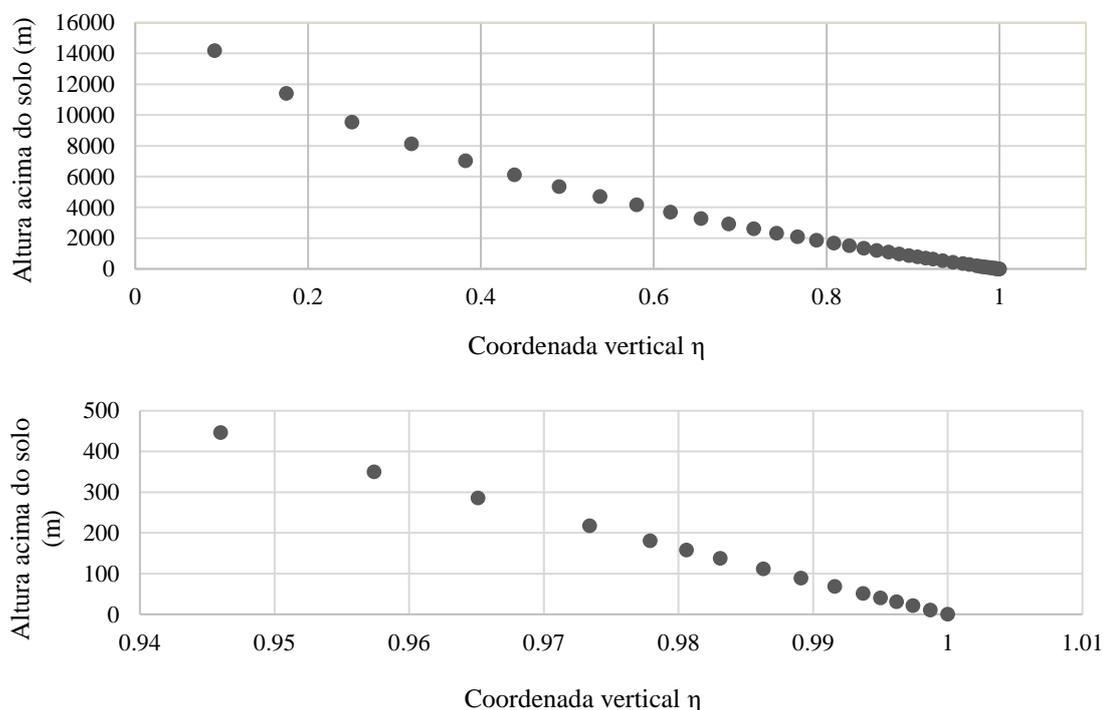
³ O modelo WRF quando acoplado ao módulo urbano do *Building Effect Parameterization* também será chamado de uWRF.

Tabela 4: Característica de cada domínio utilizado nas simulações com o modelo meteorológico WRF.

Domínio	Espaçamento de grade	Número de células (colunas x linhas)	Extensão territorial
D01	25 km x 25 km	60 x 60	1500 km x 1500 km
D02	5 km x 5 km	121 x 121	605 km x 605 km
D03	1 km x 1 km	126 x 126	126 km x 126 km

Para as condições iniciais e de contorno do domínio D01 utilizou-se os dados de *Final Analysis* (fnl) do *National Center for Environmental Prediction*, com resolução espacial horizontal de $0,25 \times 0,25^\circ$ e temporal de 6h. Para aproveitar ao máximo a capacidade do módulo urbano multicamadas em estimar a influência dos edifícios nos fluxos verticais da atmosfera, de forma a ter diversas camadas dentro do cânion urbano, principalmente, foram adotados 44 níveis verticais eta⁴, os quais encontram-se representados nos gráficos da Figura 25. Os primeiros 16 níveis encontram-se nos primeiros 500 m, sendo que a profundidade do nível mais baixo é de, aproximadamente, 10 m acima do solo. Tal configuração também foi aplicada ao WRF padrão. Cabe ressaltar que o manual do modelo BEP não faz nenhuma determinação quanto ao número de níveis verticais que deve ser adotado, cabendo a ponderação ao usuário.

Figura 25: Níveis eta utilizados nas simulações com o modelo meteorológico WRF em ambas as versões (superior), com zoom nas primeiras 15 camadas (inferior).



⁴ Níveis eta utilizados nas simulações com o modelo WRF em ambas as versões, padrão e urbana: 1.000, 0.9987, 0.9974, 0.9962, 0.9950, 0.9937, 0.9916, 0.9891, 0.9863, 0.9831, 0.9806, 0.9779, 0.9734, 0.9651, 0.9574, 0.9460, 0.9342, 0.9230, 0.9145, 0.9052, 0.8950, 0.8838, 0.8714, 0.8578, 0.8428, 0.8263, 0.8082, 0.7883, 0.7663, 0.7422, 0.7157, 0.6865, 0.6544, 0.6191, 0.5802, 0.5375, 0.4905, 0.4388, 0.3819, 0.3194, 0.2506, 0.1749, 0.0916, 0.0000.

As informações geográficas estáticas foram todas interpoladas de bancos de dados padrões do WRF, à exceção do uso e ocupação do solo que foi atualizado para as simulações urbanas. Na versão 3.9.1.1, os dados relativos ao item citado é proveniente de uma campanha anual realizada em 2001 pelos instrumentos Aqua e Terra do satélite *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (BHATI e MOHAN, 2018). São vinte classes que fazem distinção entre vários tipos de cobertura do solo, como florestas, terras cultivadas, solo nu e corpos d'água, mas que engloba toda a heterogeneidade das cidades em uma única classe. Desta forma, para a versão urbana, o uso e ocupação do solo foi atualizado utilizando como base a classificação LCZ da RMBH.

A conversão do mapa com as zonas climáticas para o formato binário aceito pelo WPS foi realizada segundo orientado por Martilli *et al.* (2016). Ressalta-se que somente as classes urbanas da LCZ foram inseridas na atualização, aproveitando-se a classificação já existente no banco de dados do MODIS para as classes naturais. Como resultado, foi gerado um novo arquivo com uso e ocupação do solo, desta vez com a extensão da mancha urbana atualizada para as condições atuais de ocupação e segmentada em mais classes, de forma que as diferentes áreas existentes nas cidades possam ser reconhecidas. O uso e ocupação do solo usados nas simulações padrão e urbana, bem como a denominação das classes, encontram-se na Figura 26 e Tabela 5, respectivamente. Na figura é possível observar o crescimento da RMBH entre 2001 e 2016 e a diferenciação da área de acordo com as classes urbanas da LCZ. É importante mencionar que a classificação LCZ gerada pelo SAGA tem pixels de 100 m que foram interpolados para células de 1 km, na ocasião da referida conversão baseada em Martilli *et al.* (2016), levando à perda de detalhes.

Figura 26: Uso e ocupação do solo utilizado nas simulações (a) padrão e (b) urbana e os números das respectivas classes.

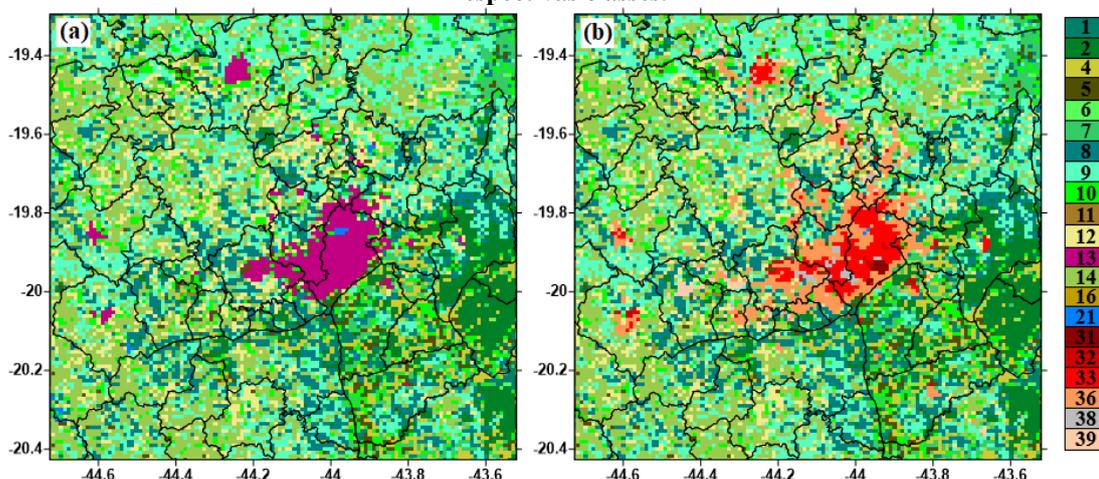


Tabela 5: Denominação das classes de uso e ocupação do solo utilizadas (MODIS + LCZ).

N° da classe	Denominação	Tradução livre
1	<i>Evergreen Needleleaf Forest</i>	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada
2	<i>Evergreen Broadleaf Forest</i>	Floresta perene composta por vegetação latifoliada
4	<i>Deciduous Broadleaf Forest</i>	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada
5	<i>Mixed Forests</i>	Florestas mistas
6	<i>Closed Shrublands</i>	Vegetação arbustiva densa
7	<i>Open Shrublands</i>	Vegetação arbustiva esparsa
8	<i>Woody Savannas</i>	Savana arborizada
9	<i>Savannas</i>	Savana (pastagem)
10	<i>Grasslands</i>	Vegetação herbácea
11	<i>Permanent Wetlands</i>	Área permanentemente alagada
12	<i>Croplands</i>	Áreas cultivadas
13	<i>Urban and Built-Up</i>	Áreas urbanas e construídas
14	<i>Cropland/Natural Vegetation Mosaic</i>	Mosaico de lavoura/vegetação natural
16	<i>Barren or Sparsely Vegetated</i>	Área árida ou pouco vegetada
17	<i>Water</i>	Água
31	LCZ 1	-
32	LCZ 2	-
33	LCZ 3	-
36	LCZ 6	-
38	LCZ 8	-
39	LCZ 9	-

Para que o módulo urbano possa reconhecer as diferentes classes urbanas, além do agrupamento das zonas com características comuns, como realizado acima, é necessário ainda o preenchimento da tabela URBPARM.TBL do BEP. Nela são inseridos diversos parâmetros do cânion urbano dependentes do tipo de ocupação (LCZ), a saber: capacidade térmica, emissividade, condutividade térmica e albedo do material constituinte majoritário das vias, telhados e paredes; comprimento de rugosidade sobre a via e o telhado; condição de contorno inferior para temperatura do telhado, parede e assoalho; orientação e largura das vias e dos edifícios; e distribuição das alturas dos edifícios.

Na Tabela 6, encontram-se os valores adotados para a distribuição da altura dos edifícios. Para as LCZ 1 e 2, foi selecionado um quarteirão padrão em cada amostra de treinamento usada na classificação. Na modalidade de *Street View* do Google Earth todas as construções presentes no quarteirão escolhido tiveram o número de pavimentos mapeados. Foi calculada a frequência de aparecimento de cada pavimento em um determinado quarteirão e posteriormente, realizada a média aritmética entre os quarteirões. Adotando-se como pé direito o valor de 5,0 m foi possível, então, estimar a distribuição da altura. Assim, para a LCZ 1, por exemplo, foram analisados cinco quarteirões pertencentes aos bairros em que as amostras de treinamento foram selecionadas, a saber: Funcionários, Sion, Santo Agostinho, Buritis e Luxemburgo (todos na cidade de Belo Horizonte). O número de pavimentos de todas as construções pertencentes à

cada quarteirão foi contado. Em seguida, tal número foi usado para calcular a frequência de aparecimento de cada pavimento em cada quarteirão. Por fim, foi realizado uma média entre as frequências dos cinco quarteirões analisados e estimada a altura, considerando que cada pavimento apresentava de pé direito um valor de 5,0 m. O mesmo procedimento foi realizado para a LCZ 2, para os bairros Padre Eustáquio, Cidade Nova, Gutierrez e Prado. Já para a LCZ 3, devido ao maior número de amostras, somente 7 dos 14 quarteirões foram avaliados. Na seleção das amostras a serem consideradas, procurou-se selecionar bairros de diferentes regionais de Belo Horizonte e cidades. As amostras escolhidas encontram-se nos bairros Céu Anil/ Ribeirão das Neves, Maria Goretti – regional Nordeste/ BH, Pedro II – regional Noroeste/ BH, Montreal/ Sete Lagoas, Marajoara/ Betim, região sudoeste/ Caeté e Minas Caixa - regional Venda Nova/ BH. Para as LCZ 6 e 9, foi considerado que todas as construções possuíam somente um pavimento, sendo tal aproximação bastante razoável uma vez que são áreas menos adensadas. Para a LCZ 8, em que predominam a existência de grandes galpões, assumiu-se que estes possuiriam altura equivalente à uma casa de dois pavimentos, sendo mais largos do que altos.

Tabela 6: Frequência e altura média dos edifícios da RMBH.

Altura (m)	Probabilidade de ter um edifício com altura h (%)					
	LCZ 1	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9
5	10	30	65	100	-	100
10	5	20	35	-	100	-
15	5	10	-	-	-	-
20	25	30	-	-	-	-
25	15	10	-	-	-	-
30	5	-	-	-	-	-
35	5	-	-	-	-	-
40	5	-	-	-	-	-
45	5	-	-	-	-	-
50	5	-	-	-	-	-
55	15	-	-	-	-	-

Na Tabela 7, estão expressos os parâmetros morfométricos adotados para cada LCZ. As orientações das ruas consideradas foram de 0° e 90° (em relação ao norte), para fins de simplificação, mas qualquer angulação é possível. A largura das vias foi estimada com base na Lei Municipal de Belo Horizonte nº 8137/00. Foi considerado que as LCZ 1 e 8 têm perfil mais comercial, enquanto as demais LCZ são predominantemente residenciais, desta forma as primeiras devem estar localizadas em vias que permitam um maior fluxo de tráfego do que as segundas. Assim, assumiu-se que as LCZ 1 e 8 localizam-se em vias comerciais e as LCZ 2, 3,

6 e 9 em vias locais. Segundo a referida lei, as vias veiculares coletoras devem apresentar no mínimo 2 (duas) pistas de rolamento, totalizando-se uma largura mínima de 6m (seis metros) de pista, enquanto as vias locais podem apresentar vias com 1 (uma) ou 2 (duas) pistas, com largura mínima de 3,00 m (três metros) ou 6,00 m (seis metros), respectivamente. Além da pista de rolamento, também foi contabilizada a largura dos passeios de acordo com a orientação de “Padronização de passeios para o município de Belo Horizonte”, sendo adotado o valor de 2,5 m para cada lado da via (PBH, 2014). Para as vias coletoras a largura estimada foi de 17 m e para as locais, 11 m (partindo do princípio de que as pistas são simples). Os valores adotados foram, então arredondados para 20 m e 15 m, respectivamente. Com relação a largura dos edifícios, esta foi estimada a partir da observação das construções contidas nos quarteirões padrão mencionados anteriormente. Foi adotado aquele valor que mais se repetiu.

Tabela 7: Parâmetros morfométricos da RMBH.

LCZ	Orientação das vias (°)	Largura das vias W (m)	Largura dos edifícios B (m)
1	0°, 90°	20	15
2	0°, 90°	15	20
3	0°, 90°	15	12
6	0°, 90°	15	12
8	0°, 90°	20	25
9	0°, 90°	15	12

Na Tabela 8, encontram-se os UCPs adotados para a fração do solo urbano livre de cobertura vegetal, as propriedades físicas das superfícies urbanas, comprimentos de rugosidade para cálculo de momentum e condições de limite inferior para temperatura. Todos os parâmetros foram adotados de outros estudos com dados observados ou modelados para cada LCZ.

O primeiro item foi calculado baseando-se nos valores apresentados pela fração permeável relativa a cada LCZ expressa em Stewart e Oke (2012). Assim, a fração coberta por áreas urbanas (impermeável) relacionada a LCZ corresponde à diferença entre o valor máximo da variável (1) e a fração permeável.

Os dados de capacidade e condutividade térmicas foram adotados de Hammerberg *et al.* (2018). Como a área considerada pelos autores não apresentava os valores para todas as LCZ necessárias à este estudo (somente para as classes 2, 5, 6, 8 e 9), foi preciso a realização de algumas aproximações. Assumiu-se que as características dos materiais das LCZ 2 e LCZ 6 são similares aos das LCZ faltantes, 1 e 3, respectivamente.

É importante ressaltar que tais parâmetros foram extraídos de um estudo de uma cidade de clima temperado (Basileia, na Suíça) e no qual, portanto, as construções devem apresentar envoltórias que garantam o seu isolamento térmico para a manutenção da temperatura dos ambientes internos. Principalmente para as regiões mais quentes, como é o caso do sudeste do Brasil, de clima tropical, tal consideração pode levar à adoção de valores distintos daqueles encontrados na realidade. No entanto, esta foi uma condição necessária visto que são poucos os trabalhos que caracterizam as LCZ de acordo com os parâmetros necessários à inicialização do BEP. Finalmente, os parâmetros relativos ao albedo, emissividade e comprimento de rugosidade foram todos baseados em Stewart *et al.* (2014).

Tabela 8: Parâmetros térmicos, radiativos e aerodinâmicos das superfícies urbanas da RMBH.

Parâmetros do cânion urbano	Unidade	LCZ 1	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9	Referência
Fração do solo urbano livre de cob. vegetal	Fração	0.90	0.85	0.80	0.70	0.85	0.40	1
Capacidade térmica volumétrica do telhado	J.m ⁻³ .K ⁻¹	1.80 x 10 ⁶	1.80 x 10 ⁶	1.44 x 10 ⁶	1.44 x 10 ⁶	1.80 x 10 ⁶	1.44 x 10 ⁶	2
Capacidade térmica volumétrica da parede	J.m ⁻³ .K ⁻¹	2.00 x 10 ⁶	2.00 x 10 ⁶	2.00 x 10 ⁶	2.05 x 10 ⁶	1.80 x 10 ⁶	2.56 x 10 ⁶	2
Capacidade térmica volumétrica da via	J.m ⁻³ .K ⁻¹	1.50 x 10 ⁶	1.50 x 10 ⁶	1.47 x 10 ⁶	1.47 x 10 ⁶	1.80 x 10 ⁶	1.37 x 10 ⁶	2
Condutividade térmica do telhado	J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹	1.25	1.25	1	1	1.25	1	2
Condutividade térmica da parede	J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹	1.45	1.45	1.25	1.25	1.25	1	2
Condutividade térmica da via	J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹	0.62	0.62	0.6	0.6	0.8	0.55	2
Albedo superficial do telhado	Fração	0.13	0.18	0.15	0.13	0.18	0.13	3
Albedo superficial da parede	Fração	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	3
Albedo superficial da via	Fração	0.15	0.16	0.18	0.21	0.17	0.23	3
Emissividade superficial do telhado	-	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	3
Emissividade superficial da parede	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3
Emissividade superficial da via	-	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	3
Comprimento de rugosidade sobre a via	m	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	3
Comprimento de rugosidade sobre o telhado	m	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	3
Condição de contorno inferior para temperatura do telhado	K	293	293	293	293	293	293	4
Condição de contorno inferior para temperatura da parede	K	293	293	293	293	293	293	4
Condição de contorno inferior para temperatura da via	K	293	293	293	293	293	293	4

¹Stewart e Oke (2012).

²Hammerberg *et al.* (2018).

³Stewart *et al.* (2014).

⁴Mantido da URBPARM.TBL.

4.3.2 Parametrização do WRF padrão e urbano

Com objetivo de melhor representar as condições meteorológicas da RMBH através da modelagem numérica, foram realizadas diversas simulações variando-se os esquemas físicos do modelo WRF em sua versão padrão, ou seja, utilizando os dados de uso e ocupação padrão do MODIS e sem a acoplagem do módulo urbano. Todas as parametrizações testadas encontram-se descritas na Tabela 9.

A princípio, as combinações foram baseadas nos melhores resultados obtidos em estudos realizados também para regiões tropicais em períodos secos, como neste estudo, com o intuito de filtrar as opções possíveis e direcionar as tentativas, embora não exista garantia de que as modelagens apresentarão resultados satisfatórios por este motivo. Inicialmente, foram testadas cinco parametrizações. A primeira, P1, foi obtida do trabalho de Reboredo *et al.* (2015), em que foi testada a sensibilidade do modelo frente a diferentes escolhas de esquemas de microfísica, CLP e cumulus para a cidade de Bogotá, na Colômbia. Já a simulação P2, foi realizada por Pedruzzi (2016) para a Região Metropolitana da Grande Vitória, como etapa preliminar à utilização do modelo de qualidade do ar CMAQ para avaliar a influência de condições de contorno. A terceira combinação, P3, baseou-se na simulação de Homann (2014) para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), em que se avaliou as mudanças nos padrões de circulação de mesoescala ocasionadas a partir da expansão territorial da cidade. Por fim, as parametrizações P4 e P5, realizadas, respectivamente, por Silva e Fisch (2014) e Schuch e Fisch (2017), foram obtidas de simulações meteorológicas para o Centro de Lançamento de Alcântara, em São José dos Campos/SP, em que se buscou estudar o perfil de ventos tanto para verificação da interferência deste na trajetória de foguetes quanto no transporte e dispersão dos poluentes atmosféricos emitidos após seu lançamento.

Depois de executadas as simulações, os dados modelados foram comparados aos dados observados, por meio do cálculo de índices estatísticos, como melhor descrito no item 4.3.3, a fim de se verificar seu desempenho na representação das condições meteorológicas do período estudado. As parametrizações realizadas posteriormente foram baseadas nos primeiros testes a partir da variação de alguns esquemas físicos e a checagem das alterações provocadas no desempenho da modelagem, até escolha de uma parametrização considerada satisfatória. Não foram testadas grande diversidade de esquemas para cumulus uma vez que durante o período estudado predominam condições de céu claro, impostas à região pela ASAS.

Tabela 9: Parametrizações físicas testadas no modelo WRF padrão.

Simulação	Microfísica	Radiação onda longa	Radiação onda curta	Camada superficial	Sup. terrestre	CLP	Cumulus ⁵
P1	Morrison 2-moment	RRTM	Dudhia	Revised MM5	Noah LSM	BouLac	BMJ
P2	WSM3	RRTM	Dudhia	Revised MM5	Noah LSM	BouLac	BMJ
P3	WSM3	RRTM	Dudhia	Revised MM5	Noah LSM	YSU	Kain-Fritsch
P4	WSM3	RRTM	Dudhia	Revised MM5	Noah LSM	YSU	Kain-Fritsch
P5	WSM5	RRTM	Dudhia	Revised MM5	Noah LSM	MYNN level 2.5	Kain-Fritsch
P6	WSM3	RRTM	Dudhia	MYNN	Noah LSM	MYNN level 2.5	Grell-3
P7	Morrison 2-moment	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	BouLac	BMJ
P8	Morrison 2-moment	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	MYNN level 2.5	BMJ
P9	Morrison 2-moment	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	MYNN level 2.5	BMJ
P10	Morrison 2-moment	CAM	CAM	Revised MM5	Noah LSM	YSU	BMJ
P11	WSM6	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	BouLac	BMJ
P12	Morrison 2-moment	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	BouLac	Grell-Freitas
P13	WSM6	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	MYJ	BMJ
P14	WSM6	RRTMG	RRTMG	MM5	Noah LSM	YSU	New Tiedtke
P15	WSM6	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	MYJ	New Tiedtke
P16	Lin (Purdue)	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	MYNN level 2.5	BMJ
P17	Lin (Purdue)	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	BouLac	BMJ
P18	Lin (Purdue)	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	ACM2	BMJ
P19	WSM6	New Goddard	New Goddard	Eta	Noah LSM	MYJ	BMJ
P20	WSM6	RRTMG	RRTMG	MYNN	Noah LSM	MYNN level 2.5	BMJ
P21	WSM6	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	UW	BMJ
P22	WSM6	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	YSU topo_wind =1	BMJ
P23	WSM6	RRTMG	RRTMG	Revised MM5	Noah LSM	YSU topo_wind =2	BMJ

Para tornar possível a avaliação das alterações provocadas unicamente pela acoplagem do módulo urbano e a atualização do solo, uma mesma parametrização física deveria ser aplicada às versões padrão e urbana do modelo. Porém, até o momento, a formulação do BEP somente permite seu funcionamento com o modelo de superfície terrestre Noah LSM e os esquemas de

⁵ A parametrização para cumulus foi aplicada somente para os domínios com resolução superior à de 1 km.

CLP Mellor–Yamada–Janjic (MYJ) e Bougeault-Lacarrère (BouLac) (MARTILLI *et al.*, 2009).

A princípio, não necessariamente a parametrização do modelo padrão com os resultados mais satisfatórios faria o uso dos esquemas mencionados, de modo a permitir que a mesma parametrização fosse aplicada também à versão urbana. Desta forma, optou-se por selecionar duas opções de parametrizações. Uma delas foi escolhida somente entre as parametrizações físicas que fizeram o uso dos esquemas físicos citados, com o foco em uma boa representação da temperatura próxima à superfície, a ser aplicada na condução dos demais objetivos deste estudo. A outra foi selecionada sem restringir os esquemas físicos usados e focou em uma melhor representação do vento, para servir como diretriz à futuros estudos na área de qualidade do ar para a RMBH.

4.3.3 Avaliação do desempenho das modelagens padrão e urbana

Para a avaliação de desempenho de cada parametrização física foi aplicado o cálculo de indicadores estatísticos, comparando-se os dados simulados com os observados em estações meteorológicas, conforme definido por Emery *et al.* (2001), para as variáveis de temperatura do ar, velocidade do vento, direção do vento e umidade específica do ar. Neste método clássico, assume-se que as medições pontuais registradas pelas estações podem ser comparadas às saídas do modelo, que representam valores médios calculados para uma célula de grade de 1 km². Os indicadores propostos por tais autores, bem como as equações para seus respectivos cálculos, são dados a seguir.

- Viés médio (*mean bias* - MB): mede a tendência de o modelo superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o parâmetro meteorológico em relação ao observado (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011).

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_s - d_o) \quad (12)$$

Para a validação da direção do vento, o cálculo de MB será dado pela Eq. 13 (MUGHAL *et al.*, 2017). Tal consideração é necessária em função da direção ser uma variável circular.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_s - d_o) \left| 1 - \left(\frac{360}{|d_s - d_o|} \right) \right| \quad (13)$$

se $|d_s - d_o| > 180^\circ$

- Erro médio absoluto (*mean absolute gross error* – MAGE): similar à equação de MB, o módulo do erro médio absoluto anula a compensação de erros positivos e negativos do índice anterior, sendo considerado uma precisa medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981 *apud* HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011).

$$MAGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_s - d_o| \quad (14)$$

A mesma consideração realizada no cálculo do viés médio para a direção do vento deve ser feita para o MAGE, como determinado pela Eq. 15 (MUGHAL *et al.*, 2017).

$$MAGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_s - d_o| \left| 1 - \left(\frac{360}{|d_s - d_o|} \right) \right| \quad (15)$$

se $|d_s - d_o| > 180^\circ$

- Raiz do erro quadrático médio (*root mean square error* - RMSE): representa a raiz quadrada do erro médio quadrático (*mean square error* - MSE), que é a média quadrática das diferenças entre os pares dos dados simulados com os observados (PEDRUZZI, 2016; HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011). Ao contrário do MSE fornece a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011);

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_s - d_o)^2} \quad (16)$$

- Índice de concordância (*index of agreement* - IOA): é uma medida normalizada do grau de erro de previsão do modelo e varia entre 0 e 1 (PEDRUZZI, 2016). Variando entre 0 e 1, quanto maior o índice melhor a concordância entre o dado simulado e o observado (WILLMOTT, 1984).

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_s - d_o)^2}{\sum_{i=1}^n (|d_s - \bar{d}_o| + |d_o - \bar{d}_o|)^2} \quad (17)$$

Em que: d_s é o dado horário proveniente da simulação com o modelo meteorológico no tempo t ; d_o é o dado horário observado/medido em uma determinação estação meteorológica de superfície no tempo t ; \bar{d}_o é a média aritmética dos dados observados/medidos na estação meteorológica considerada; n é o número de observações consideradas.

Emery *et al.* (2011) propõem ainda valores de referência (*benchmarks*) para cada variável, como pode ser observado na Tabela 10, auxiliando assim na escolha das simulações que tiveram desempenho mais satisfatório. A proposição de tais *benchmarks* foi baseada em resultados de simulações meteorológicas para o estado do Texas e de um estudo para o centro-oeste dos Estados Unidos, para o qual foram compilados, aproximadamente, trinta saídas regionais de simulações meteorológicas de diferentes aplicações. Para a definição dos referidos *benchmarks* foram identificados o desempenho “típico” das simulações compiladas, por meio do cálculo da média, mediana e percentil 80. Para a maioria das variáveis meteorológicas foram adotados valores ou faixas localizadas entre a média e o percentil 80, excluindo, portanto, aquelas simulações que exibiram um desempenho particularmente ruim em relação à maioria.

Tabela 10: Índices estatísticos utilizados na validação das simulações meteorológicas e os respectivos valores de referência.

Variável meteorológica	Indicador	Valores de referência <i>Benchmark</i>
Temperatura do ar (2m)	MB (°C)	≤± 0,50
	MAGE (°C)	≤ 2,00
	IOA	≥ 0,80
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	≤± 0,50
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2,00
Direção do vento (10m)	MB (°)	≤± 10,00
	MAGE (°)	≤ 30,00
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	≤± 1,00
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2,00
	IOA	≥ 0,60

Para o cálculo dos índices foram utilizados os dados observados em quatro estações meteorológicas de superfície automáticas na RMBH, operadas pelo INMET, e a estação do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (Confins/MG), associada a Rede de Meteorologia (REDEMET) do Comando da Aeronáutica. O INMET também possui uma estação no

município de Florestal, porém segundo uma FICHA DE INSPEÇÃO (nº:41/2017) disponibilizada pelo 5º Distrito de Meteorologia (Disme), em que constam informações sobre uma manutenção preventiva realizada no dia 27 de setembro de 2017, foi verificado a presença de uma caixa de marimbondos no sensor de umidade desta estação, o que pode ter prejudicado sua medição. Desta forma, optou-se por não utilizar nenhum dos dados de Florestal. Na Figura 27, podem ser observadas as localizações das estações utilizadas na validação da modelagem e na Tabela 11, informações sobre suas respectivas altitudes.

Figura 27: Localização das estações meteorológicas utilizadas na validação do modelo WRF.

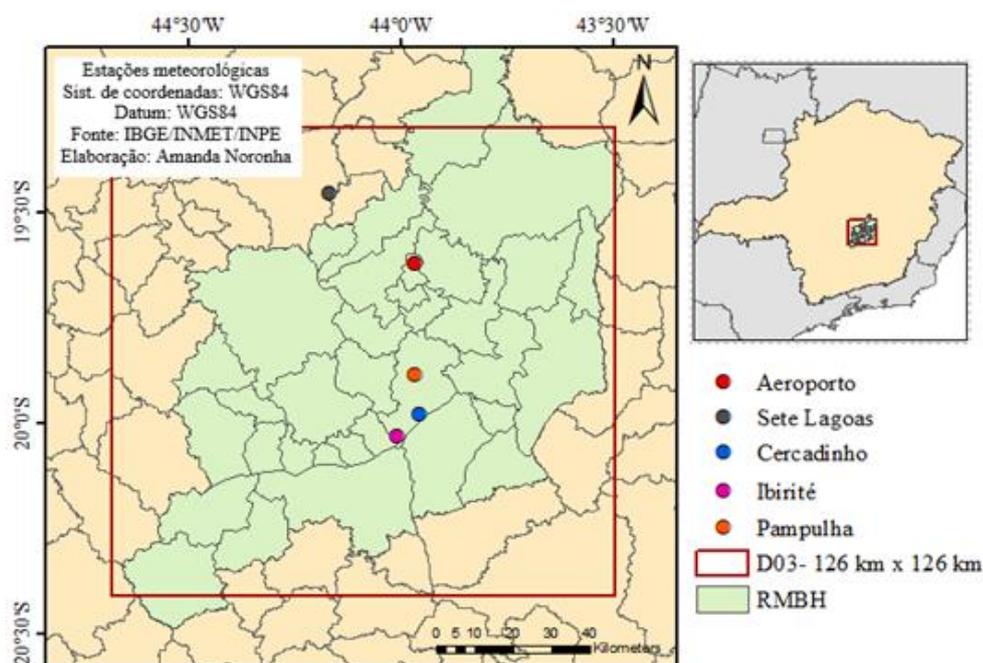


Tabela 11: Altitude das estações meteorológicas de superfície inseridas na RMBH para validação das simulações do WRF.

Estações met.	Aeroporto Confins	Cercadinho	Ibirité	Pampulha	Sete Lagoas
Altitude (m)	828	1.200	1.199	854	719

A posse das informações sobre a localização das estações é de grande auxílio na compreensão da influência que as características do sítio, como a altitude e uso e ocupação do solo, podem apresentar sobre as variáveis meteorológicas. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define critérios técnicos para a instalação das estações de modo a evitar interferências nas observações. As instruções orientam que as estações estejam localizadas em lugares que se caracterizam por condições de boa visibilidade (entre 10 a 20 km), livre de sombreamento por

qualquer obstáculo, cercado por tela (alambrado), sobre solos gramados e com abrigos pintados de branco (WMO, 2008).

Recomenda-se que ao redor desta também seja evitada o plantio de árvores e o posicionamento muito próximo à construções e terrenos cobertos por concreto ou outro material que interfira no balanço de radiação (WMO, 2008). Na Figura 28, em que constam as fotos das estações e de suas respectivas vistas aéreas obtidos do Google Earth (tomadas a 3 km de altura), observa-se que nem sempre as orientações são atendidas, sendo possível perceber alguns fatores que devem ser levados em consideração na análise dos elementos meteorológicos medidos.

Observa-se pela fotografia que a estação de Cercadinho localiza-se em uma encosta vegetada na zona sul de Belo Horizonte, circundada por áreas urbanas, em todas direções, de diferentes graus de verticalização e adensamento. Já para a estação de Florestal observa-se que as áreas construídas encontram-se muitos mais próximas, além da presença de um cinturão verde com vegetação arbórea. Para a estação de Ibirité, localizada na Serra do Rola Moça, observa-se que não existem elementos urbanos nas cercanias, somente vegetação rasteira e de porte arbustivo.

Para estação da Pampulha, que se encontra dentro da Estação Ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), é possível observar um complexo mosaico composto por vegetação mais densa a norte, oeste e sudoeste, enquanto nas direções leste e sudeste tem-se uma área urbana densamente ocupada, principalmente, por construções de baixa altura. Por fim, na estação de Sete Lagoas, localizada na zona rural do município, tem-se a predominância de vegetação rasteira e de culturas, sem grandes obstruções. Assim, é possível observar que nem todas as estações encontram-se cercadas para garantir a segurança dos equipamentos e distantes de fatores que possam interferir na medição de alguns dos parâmetros meteorológicos. A estação de Confins localiza-se próxima à pista do aeroporto e tem como objetivo efetuar observações e informes meteorológicos úteis à navegação aeronáutica, monitorando parâmetros específicos e apresentando outros requisitos locais.

Figura 28: Fotografias das estações meteorológicas inseridas na RMBH e vistas superiores.

Est.	Fotografia	Vista superior
Cerc.		
Confins	Fotos da estação não disponíveis online.	
Ibirité		
Pamp.		
Sete Lagoas		

Fonte: INMET (2017), Google Earth (2018).

Com o propósito de se verificar se a ativação do BEP em conjunto com a atualização do solo foi capaz de provocar diferenças significativas na modelagem dos parâmetros meteorológicos, foi utilizado o teste não-paramétrico de Wilcoxon (*signed-ranks*) para dois grupos de amostras pareadas (dados modelados pelo WRF padrão e urbano), com nível de significância de 5% ($\alpha=0.05$). Os testes foram realizados para todas as variáveis que foram validadas, com o auxílio do software Statistica 10.

Inicialmente, os dados de um determinado grupo são subtraídos dos seus correspondentes no outro grupo, dando origem à diferenças que são positivas ou negativas. Posteriormente, tais valores são ordenados de forma crescente em função de seu módulo. A diferença de menor valor absoluto recebe o posto n°1, o segundo menor valor, o posto n°2, e assim por diante. Finalizado o ranqueamento, são reunidos e somados em um grupo aqueles postos (ou posições) referentes às diferenças que apresentaram sinal positivo (T_+) e em outro grupo aqueles que apresentaram sinal negativo (T_-). O valor numérico associado à menor soma é, então, comparado à um valor crítico (W_{crit}) em uma tabela de significância do teste de Wilcoxon, similarmente como é feito no teste t de Student. Se a soma mencionada for inferior ao valor crítico dado pela tabela, a hipótese nula (H_0) é rejeitada, logo existe diferença significativa entre os grupos amostrais (WOOLSON, 2008).

A premissa em que se baseia o teste é a de que se existirem somente diferenças aleatórias, como postulado pela hipótese nula, estas serão igualmente distribuídas entre positivas e negativas (WOOLSON, 2008). Se for verificado uma tendência ao favorecimento de uma das situações, então, as diferenças não podem ter sido geradas pelo acaso, hipótese (H_1) para a qual é confirmada a sua significância (WOOLSON, 2008).

Além da comparação com os dados observados em estações meteorológicas de superfície, também é necessária a verificação da reprodução das condições atmosféricas verticalmente. Para tal, usualmente são comparados os perfis verticais modelados de temperatura do ar, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento frente a dados observados por radiossondagens realizadas diariamente em alguns aeroportos. A disponibilidade de tais dados para o aeroporto de Confins foi checada nos endereços eletrônicos de instituições⁶ que realizam a compilação de tais informações globalmente, porém os dados referentes ao período de estudo

⁶ Os dados de radiossondagem podem ser verificados nos bancos mantidos pela *University of Wyoming*, no endereço eletrônico <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, e pela *National Oceanic and Atmospheric Administration*, em <https://ruc.noaa.gov/raobs/>.

considerado (setembro de 2017) não estavam disponíveis. O aeroporto mais próximo à RMBH em que é realizada a radiossondagem localiza-se na cidade de Uberlândia, a mais de 500 km de Belo Horizonte. Assim, optou-se por não validar o perfil vertical das simulações.

4.4 *Análise dos dados meteorológicos modelados pelo WRF padrão e urbano*

4.4.1 *Modelagem meteorológica padrão para temperatura do ar e vento próximos à superfície*

Além da análise pontual das condições meteorológicas para as estações inseridas na RMBH para fins de validação das simulações padrão e urbana, também foi realizada uma avaliação horizontal dos dados de temperatura do ar e vento próximos à superfície, para todo o domínio interno D03, com o propósito inicial de se apresentar os resultados gerados pelo WRF padrão, abordagem mais comumente aplicada nos estudos de modelagem meteorológica. Foram apresentadas as médias dos horários locais de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, calculadas levando-se em consideração todo o período de estudo (05 a 09/09/17). Avaliou-se a evolução diária da temperatura do ar e o padrão de vento apresentado na RMBH, bem como sua relação com o relevo.

4.4.2 *Análise horizontal do efeito da ativação do módulo urbano na temperatura próxima à superfície e fluxos de energia superficiais*

Foram comparadas as variações produzidas pela acoplagem do módulo urbano do BEP, utilizando-se a simulação padrão como controle. Horizontalmente, o enfoque foi sobre as diferenças de temperatura do ar a 2 m para os horários locais de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h (médias) e fluxos de calor (do solo, latente e sensível) às 15h e 21h, como representantes do período diurno e noturno. Foram realizados os balanços de energia para todo o domínio, baseando-se no balanço energético superficial simplificado, apresentado anteriormente. A referida equação foi reorganizada e é apresentada abaixo (RUMAN, 2015):

$$Q^* = Q_G - (Q_H + Q_E) \quad (18)$$

A convenção de sinais adotada neste estudo considera que os fluxos relativos ao balanço energético, ou seja, fluxos de calor sensível, calor latente, calor no solo e de radiação líquida, são positivos quando dirigidos para cima e negativos quando dirigidos para baixo.

Com o propósito de se verificar a habilidade do módulo urbano em diferenciar as LCZ, também foram realizados balanços energéticos superficiais pontuais diurno (07h – 17h) e noturno (18h – 06h) em células próximas englobando todas as classes urbanas da LCZ, como apresentado na Figura 29.

Figura 29: Coordenadas geográficas de cada LCZ utilizadas no balanço energético pontual.



4.5 Avaliação da mudança nas condições meteorológicas locais da RMBH a partir de cenário de expansão da mancha urbana

Foi proposto um cenário de expansão da mancha urbana da RMBH, considerando um horizonte de longo prazo, de forma a avaliar qual seria o impacto nas condições meteorológicas locais da área de estudo. A direção de expansão da mancha para o cenário a ser simulado se deu nas direções norte, sul e oeste. Foi considerado que a urbanização não avançará no sentido leste e sudeste, uma vez que nesta região do domínio o relevo é mais acidentado e os critérios de ocupação mais restritos, em função da presença de unidades de conservação. A ocupação urbana atual foi substituída por classes LCZ mais adensadas e verticalizadas, enquanto parte das áreas suburbanas vegetadas foram substituídas por áreas urbanas mais espaçadas e de menor densidade, seguindo a lógica natural da urbanização, de acordo com os critérios definidos na Tabela 12. As classes não mencionadas na tabela foram mantidas.

No uso e ocupação do solo atual, cerca de 1300 células foram classificadas como urbanas, após a aplicação do critério para conversão este número passou para 8400 células. Para uma estimativa do aumento da área urbana, porém, é necessário levar em consideração as diferentes frações urbanas de cada classe. Assim, após a aplicação do cenário, esta apresentou um aumento de 4,5 vezes em termos de área. Os resultados da alteração encontram-se na Figura 30.

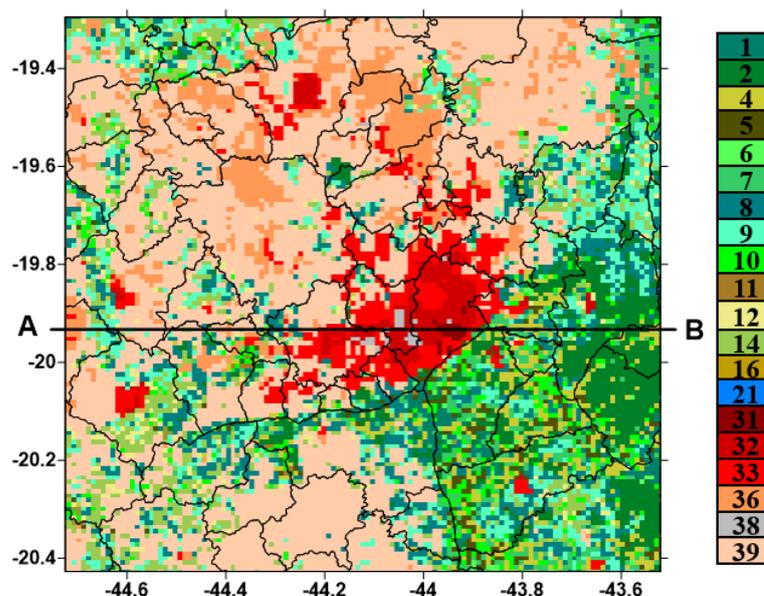
Tabela 12: Critério para conversão das LCZ para o cenário de urbanização futuro proposto.

Uso atual	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 6	LCZ 9	LCZ B	LCZ D
Uso futuro	LCZ 1	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 6	LCZ 9	LCZ 6

Para avaliar as mudanças provocadas na superfície e na baixa atmosfera, foi utilizado como controle a simulação executada pelo uWRF com a atual condição de urbanização da RMBH. As condições iniciais e de contorno do modelo meteorológico não foram modificadas, assim como as parametrizações dos processos físicos utilizadas no cenário atual. Os efeitos do crescimento da mancha urbana foram avaliados a partir da análise das diferenças de temperatura a 2m entre o cenário futuro e o corrente, produzidas em todo o domínio para todo o período de estudo.

Para uma verificação mais detalhada da relação entre a substituição das classes de uso e ocupação do solo e a temperatura próxima à superfície, foi selecionado para análise o corte transversal AB apresentado na Figura 30. Tal avaliação também foi realizada para a altura da camada limite planetária, ambas para o dia 05 de setembro de 2017. O critério para alocação do corte foi a passagem sobre áreas que apresentariam, em teoria, diferenças relevantes para análise. Assim, foram contempladas áreas com diferentes características, como o hipercentro de Belo Horizonte e regiões vegetadas à leste do domínio.

Figura 30: Cenário de expansão da mancha urbana da RMBH, com as classes de uso e ocupação do solo como definidas na Tabela 5, e o corte transversal AB usado para a análise da temperatura a 2m e altura da camada limite planetária.



4.6 Análise de sensibilidade do BEP

Como grande parte dos parâmetros do cânion urbano foram adotados de estudos com dados observados ou modelados para outras cidades, torna-se importante conhecer em que extensão a adoção desses valores como aproximação para a RMBH impactam na modelagem meteorológica. Brousse *et al.* (2017) e Hamdi e Schayes (2008) verificaram que o BEP é sensível à modificações na geometria do cânion urbano, resultando em significativas alterações da temperatura do ar ao longo do dia.

Desta forma, baseando-se nas constatações destes estudos, propôs-se para a RMBH uma alteração na razão H/W, a partir da alteração da largura das vias. Foi arbitrada uma redução de 20%, como definido na Tabela 13. Além da razão H/W, também foi testada a sensibilidade do módulo quanto à fração urbana. Os valores inicialmente adotados foram incrementados em 10%, para todas as LCZ, como mostrado na Tabela 14. Os efeitos das modificações propostas somente foram analisados pontualmente e para as variáveis T_{2m} , T_{sk} e velocidade do vento a 10m.

Tabela 13: Alteração da largura das vias para teste de sensibilidade do BEP.

LCZ	Largura das vias (m) Dado inicial	Largura das vias (m) Com 20% de redução
1	20	16
2	15	12
3	15	12
6	15	12
8	20	16
9	15	12

Tabela 14: Alteração da fração urbana para teste de sensibilidade do BEP.

Parâmetros do cânion urbano	Unidade	LCZ 1	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9
Fração urbana – Dado inicial	-	0.90	0.85	0.80	0.70	0.85	0.40
Fração urbana – 10% de incremento		0.99	0.94	0.88	0.77	0.94	0.44

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados com suas respectivas discussões serão apresentados nesta seção em tópicos. Inicialmente, foi realizada uma avaliação da “Classificação LCZ” a fim de se mapear as suas principais limitações. Posteriormente, foram analisados os resultados da “Validação do modelo meteorológico WRF” com o desempenho da parametrização física selecionada para os pontos de grade em que se localizam as estações de superfície inseridas na RMBH. Em seguida, foi feita uma “Análise detalhada das diferenças entre os dados meteorológicos modelados pelo WRF padrão e urbano” para todo o domínio estudado, em que foram comparadas as diferenças de temperatura do ar e fluxos de energia superficiais produzidas a partir da acoplagem do BEP. Em sequência foi abordado a “Avaliação da mudança nas condições meteorológicas locais da RMBH a partir de cenário de expansão da mancha urbana”. Por fim, analisou-se os resultados do “Teste de sensibilidade do BEP”.

5.1 Classificação LCZ

Muitas das incertezas relacionadas à manipulação de dados geoespaciais, incluindo a classificação supervisionada de imagens de satélite, podem ser propagados nas modelagens que utilizam tais dados como entrada, afetando, conseqüentemente, os resultados das simulações (WANG *et al.*, 2013). Assim, se faz necessário a identificação das limitações do método utilizado e dos erros produzidos, de modo a suportar a discussão de eventuais discrepâncias na modelagem meteorológica. São três os principais fatores relacionados à utilização da classificação LCZ: a adequação das classes aos usos do solo da região de estudo; os erros associados ao próprio método de classificação supervisionada; e a acurácia do usuário.

As dezessete classes que englobam toda a heterogeneidade das cidades, compostas não somente por zonas urbanas mas também zonas vegetadas e uma mistura de ambas, foram determinadas baseando-se nas ocorrências mais recorrentes. A classificação supostamente busca eliminar os fatores culturais de tal avaliação, porém é importante compreender que o modelo de urbanização, principalmente, em países subdesenvolvidos possui diferentes lógicas de organização.

No Brasil, a ocupação é, teoricamente, regulamentada por planos diretores, instrumento legal que orienta o uso e ocupação do solo, sendo obrigatório para os municípios com mais 20 mil habitantes, segundo o Art. 187, § 1º, da Constituição Federal (BRASIL, 1988). Ainda naqueles

locais em que tal documento encontra-se disponível, muitas vezes, a ocupação ocorre de forma pouco regrada, o que acarreta em grande heterogeneidade. Assim, nem sempre as ocorrências típicas enquadram-se apropriadamente no limitado número de classes propostas pela classificação LCZ. Por este motivo, as características da cidade, influenciam fortemente na qualidade da classificação gerada, existindo regiões que serão melhor ou pior classificadas (XU *et al.*, 2017).

Mais comumente, os erros de classificação estão relacionados à acurácia do usuário, que pode selecionar um baixo número de amostras ou amostras pouca representativas (com muitos pixels pertencentes a outras classes), acarretando em um mau treinamento do algoritmo classificador. Para a RMBH, após sucessivas classificações e a conferência visual entre o resultado e o real uso e ocupação do solo no Google Earth, observou-se que o algoritmo, frequentemente, confundiu as classes menos adensadas, classificando LCZs 9 como vegetação. Também foram constatados erros de atribuição de classes urbanas à locais em que não existem cidades e confusão entre estas próprias classes. Alguns exemplos dessas ocorrências são ilustradas na Figura 31. Em (a), tem-se uma LCZ 9 que foi considerada como LCZ B, em (b), observa-se uma área de mineração que foi classificada como LCZ 1 e em (c), uma LCZ 3 que foi classificada como LCZ 1.

Figura 31: Exemplos de erros de atribuição utilizando-se o método de classificação supervisionada: (a) LCZ 9, classificada como LCZ B; (b) LCZ E, classificada como LZC 1; e (c) LCZ 3, classificada como LCZ 1.



Cabe ressaltar, porém, que os erros associados às classificações supervisionadas são, muitas vezes, referentes às limitações do próprio método, ou neste caso, da metodologia proposta pelo WUDAPT. Como mencionado anteriormente, tal procedimento faz a diferenciação de áreas por meio de informações espectrais de imagens de satélites. Contudo, sabe-se de outros estudos que as respostas espectrais das diferentes áreas urbanas são muito parecidas entre si, fazendo com

que sejam frequentemente confundidas e classificadas inadequadamente (VERDONCK *et al.*, 2017). Superfícies altamente refletivas, como as áreas urbanas, podem ser confundidas ainda com solos descobertos (RASHED e JÜRGENS, 2010), como visto na Figura 31 (b).

Com o intuito de melhorar a diferenciação entre as classes urbanas, alguns estudos propõem a combinação das imagens do Landsat8 com outros produtos, como as informações espectrais e de textura do satélite ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) (XU *et al.*, 2017) ou a associação à dados de radar (BECHTEL *et al.*, 2016). No entanto, este estudo se propôs a utilizar a metodologia padrão como uma primeira aproximação para a execução dos objetivos desta pesquisa.

5.2 Validação do modelo meteorológico WRF

Foram testadas ao todo vinte e três combinações de esquemas físicos para o WRF padrão. Para todas as parametrizações propostas foram calculados indicadores estatísticos a partir dos dados observados nas estações meteorológicas presentes na área de estudo. Cabe ressaltar que não fez parte do escopo deste estudo avaliar a sensibilidade do modelo a diferentes configurações, somente selecionar àquela que possibilitou a continuidade da execução dos demais objetivos deste estudo.

A seleção de uma boa parametrização para qualquer evento em análise depende do propósito do estudo. Normalmente, uma única escolha de parametrização não é capaz de representar todos os campos meteorológicos de forma satisfatória. Assim, dificilmente será possível encontrar uma solução que seja melhor que as outras em todos os critérios simultaneamente, não existindo uma solução única, somente preferível. Comumente, o esforço de parametrização de modelos de mesoescala está relacionado ou à sua aplicação em modelos de qualidade do ar ou na análise de algum evento meteorológico em si. Para o primeiro caso, a avaliação da performance da simulação deve focar, principalmente, na habilidade dos esquemas físicos de representarem bem a direção dos ventos e sua velocidade, uma vez que afetam significativamente a dispersão e o transporte de poluentes (BAKER *et al.*, 2010; REBOREDO *et al.*, 2015). Se o estudo possuir como finalidade primária a modelagem meteorológica em si, então, a atenção deve voltar-se para àqueles parâmetros mais influenciados pelo fenômeno em análise.

Sendo assim, neste estudo foi proposta a seleção de duas parametrizações. A primeira terá como objetivo principal a reprodutibilidade da temperatura a 2 m, com foco secundário no vento a 10

m e umidade a 2 m. Tal critério foi adotado, dada à conhecida capacidade da ocupação urbana, objeto deste estudo, de modificar o balanço energético do sistema superfície-atmosfera. Já a segunda, será escolhida como uma diretriz para aproveitamento em estudos futuros de qualidade da ar para a RMBH, em que a seleção se apoiará do desempenho da predição da velocidade e da direção do vento, com foco secundário na temperatura e umidade específica do ar.

Para a determinação da parametrização com foco no estudo do clima urbano, então, foram excluídas as combinações até a obtenção de uma única opção, considerada a mais adequada a partir de alguns critérios. O primeiro deles foi a escolha do indicador MAGE da temperatura para embasar a seleção. Idealmente, é desejável que as simulações forneçam os menores erros possíveis, independente de subestimar ou superestimar a variável. Como dito anteriormente, para que seja possível a avaliação do efeito de inclusão do BEP, as parametrizações aplicadas tanto ao WRF quanto ao uWRF deveriam ser idênticas, logo foram excluídas todas as opções que não utilizaram MYJ ou BouLac como esquemas de CLP. Por fim, para as três parametrizações remanescentes também foram levados em consideração o desempenho da modelagem para as outras variáveis. Foram avaliados os MAGE para direção do vento e umidade específica do ar e RMSE para a velocidade do vento.

Após eliminação das parametrizações seguindo os primeiros critérios, foram pré-selecionadas as combinações P13, P15 e P17, apresentadas no Apêndice. Partindo para a consideração das demais variáveis como definido pelo último critério, observou-se que o valor de referência do MAGE da umidade específica foi atendido em todos os casos considerados. O indicador RMSE da velocidade do vento, em qualquer das opções, somente foi atendido para estação de Cercadinho. Assim, para a decisão da parametrização, utilizou-se como critério final o erro associado à direção do vento. A combinação que apresentou o menor número de ultrapassagens foi a P17, sendo portanto a parametrização escolhida para ser aplicada aos demais objetivos deste trabalho.

Os critérios utilizados para a seleção de uma parametrização com foco na representação do vento foram semelhantes aos aplicados ao caso anterior, sem a necessidade de limitação dos esquemas de CLP. Foram escolhidos os indicadores RMSE da velocidade do vento e MAGE da direção do vento para orientar a decisão. Inicialmente, foram excluídas todas as parametrizações que apresentaram MAGE da direção do vento maiores que 40° em qualquer

das estações, restando as opções P3, P10, P14 e P23. Para estas combinações, foram avaliadas as métricas de RMSE para a velocidade do vento. As opções que apresentaram erros superiores à $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ foram desconsideradas. Para as duas parametrizações remanescentes, P14 e P23, que são apresentadas no Apêndice, foram analisados os indicadores de erro relativos à umidade e à temperatura. Como para ambos os parâmetros os valores de referência foram atendidos, optou-se por selecionar aquela opção com os menores erros para a temperatura 2m para o maior número de estações. Desta forma, a parametrização escolhida para o vento foi a opção P14.

A parametrização P17 que apresenta melhores resultados para a predição da temperatura do ar a 2 m foi utilizada na execução dos objetivos deste trabalho voltados ao estudo do clima urbano, enquanto a parametrização P14, pode ser utilizada como uma primeira aproximação nos estudos que necessitem de uma boa representação do vetor vento na Região Metropolitana de Belo Horizonte, durante o período seco. As parametrizações selecionadas encontram-se resumidas na Tabela 15.

Tabela 15: Escolha das parametrizações mais adequadas aos estudos de qualidade do ar e do clima urbano, respectivamente, segundo critérios definidos.

Simulação	Microfísica	Radiação onda longa	Radiação onda curta	Camada superficial	Sup. terrestre	CLP	Cumulus
P14	WSM6	RRTMG	RRTMG	MM5	Noah LSM	YSU	New Tiedtke
P17	Lin (Purdue)	RRTMG	RRTMG	Eta	Noah LSM	BouLac	BMJ

Apesar dos indicadores servirem ao propósito de auxiliarem na escolha de uma determinada parametrização física, estes são um índice único em que todos os resultados encontram-se condensados. Assim, também se faz importante a análise das séries temporais dos dados observados frente aos simulados, de forma a verificar se o modelo com a parametrização selecionada é capaz de acompanhar as tendências da atmosfera tanto no período diurno quanto noturno.

Desta forma, os dados modelados utilizando-se a parametrização P17 e sua correspondente urbana U1, também apresentada no Apêndice, foram comparados com os dados medidos nas estações meteorológicas automáticas inseridas na RMBH para as variáveis de temperatura do ar a 2m, umidade específica do ar a 2m, velocidade e direção do vento a 10m. As primeiras variáveis serão apresentadas em séries horárias e as segundas compiladas em rosas dos ventos.

As classes de velocidade utilizadas para a construção das referidas rosas basearam-se na Escala de Beaufort, como mostrado na Tabela 16.

Apesar da extensa área geográfica da RMBH é baixo o número de estações meteorológicas que realizam a medição horária de dados, localizando-se, em sua maioria, em áreas rurais ou de baixa densidade demográfica. Desta forma, a área de estudo não possui estações urbanas que caracterizem as condições climáticas em diferentes LCZs, limitando a avaliação pontual do efeito que a adição do módulo do BEP ocasiona.

Tabela 16: Classificação da velocidade do vento segundo a Escala de Beaufort.

Número da Escala/ Descrição	Vel. do vento (m/s)
0 – Calmaria	$0 \leq v < 0,2$
1 – Bafagem	$0,2 \leq v < 1,5$
2 – Aragem	$1,5 \leq v < 3,3$
3 – Fraco	$3,3 \leq v < 5,4$
4 – Moderado	$5,4 \leq v < 7,9$
5 – Fresco	$7,9 \leq v < 10,7$
6 – Muito Fresco	$10,7 \leq v < 13,8$
7 – Forte	$13,8 \leq v < 17,1$
8 – Muito forte	$17,1 \leq v < 20,7$
9 – Duro	$20,7 \leq v < 24,4$
10 – Muito duro	$24,4 \leq v < 28,4$
11 – Tempestuoso	$28,4 \leq v < 32,6$
12 – Furacão	$v \geq 32,6$

Fonte: Adaptado de MARINHA DO BRASIL (1993) *apud* RIO DE JANEIRO, 2018.

Após a atualização do uso e ocupação do solo, as estações de Sete Lagoas e Ibirité mantiveram-se com as mesmas classes naturais do MODIS, enquanto as estações da Pampulha, Cercadinho e Confins classificadas anteriormente como urbanas (classe 13 do MODIS), foram substituídas por classes LCZ, tipos 6, 2 e 2, respectivamente. É importante ressaltar, então, que o BEP somente é ativado para as células urbanas, logo é esperado que, para as estações em que o uso e ocupação do solo foi mantido, as diferenças entre as simulações padrão e urbana sejam menos pronunciadas.

5.2.1 Temperatura do ar a 2 m

Os resultados gerados pela aplicação da parametrização P17 e sua correspondente urbana (U1) para as estações de Sete Lagoas, Confins, Pampulha, Cercadinho e Ibirité estão expressos nas Figuras 32, 33, 34, 35 e 36, respectivamente, e na Tabela 17. Nesta encontram-se destacados em vermelho os índices fora dos intervalos considerados ideais.

Figura 32: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Sete Lagoas.

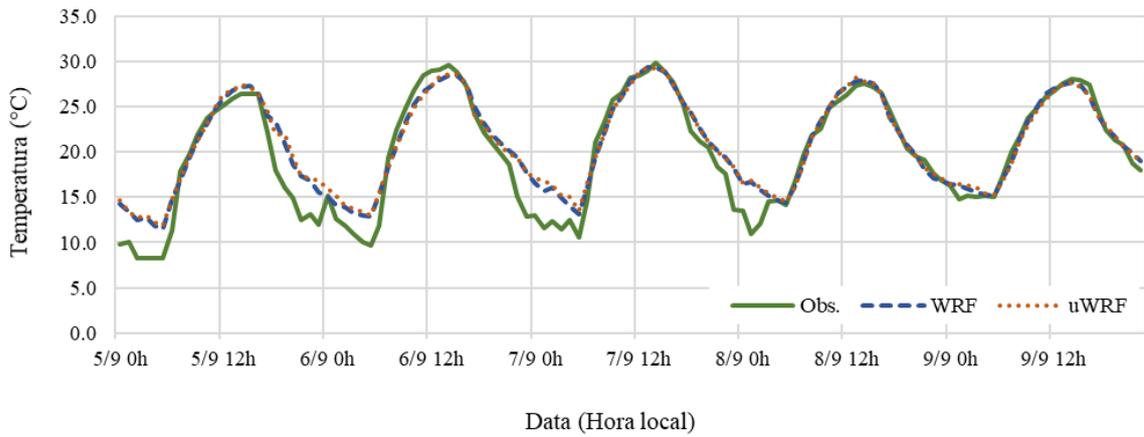


Figura 33: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Confins.

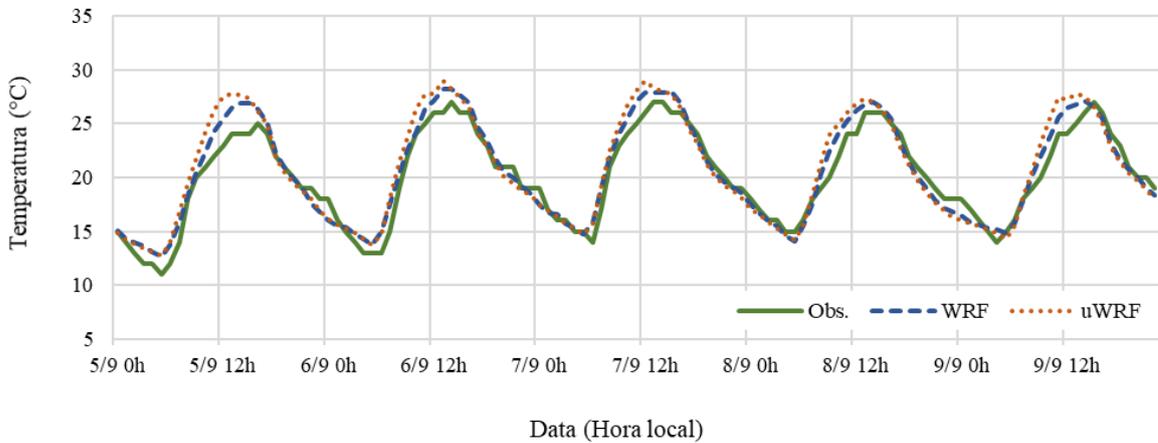


Figura 34: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática da Pampulha/BH.

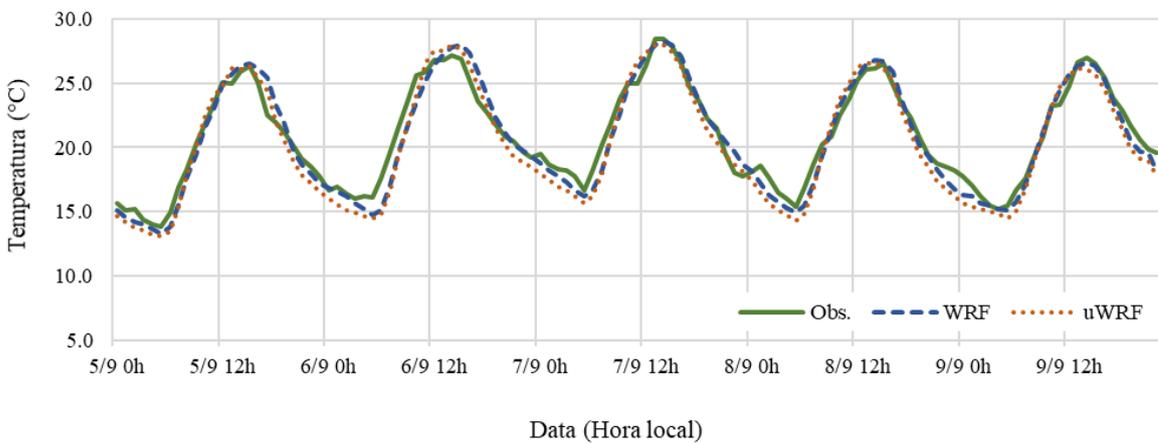


Figura 35: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Cercadinho/BH.

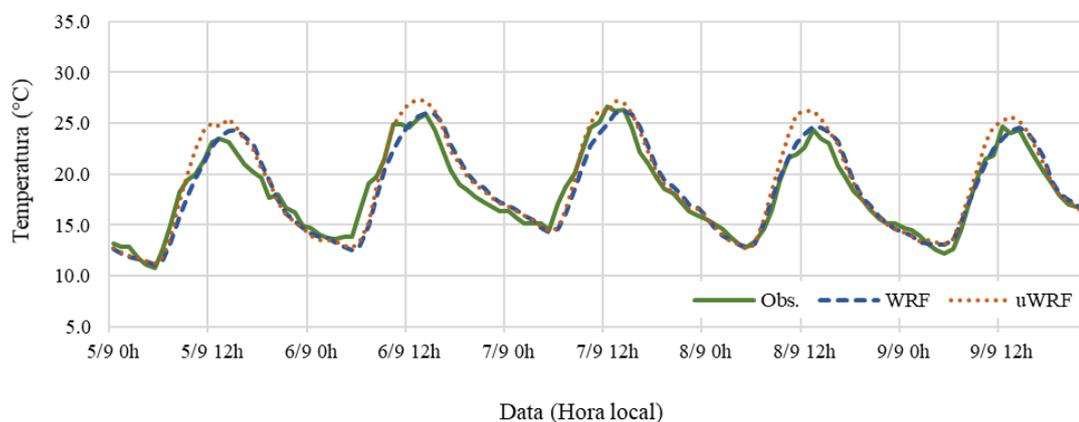


Figura 36: Séries horárias de temperatura observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Ibirité (Rola Moça)/BH.

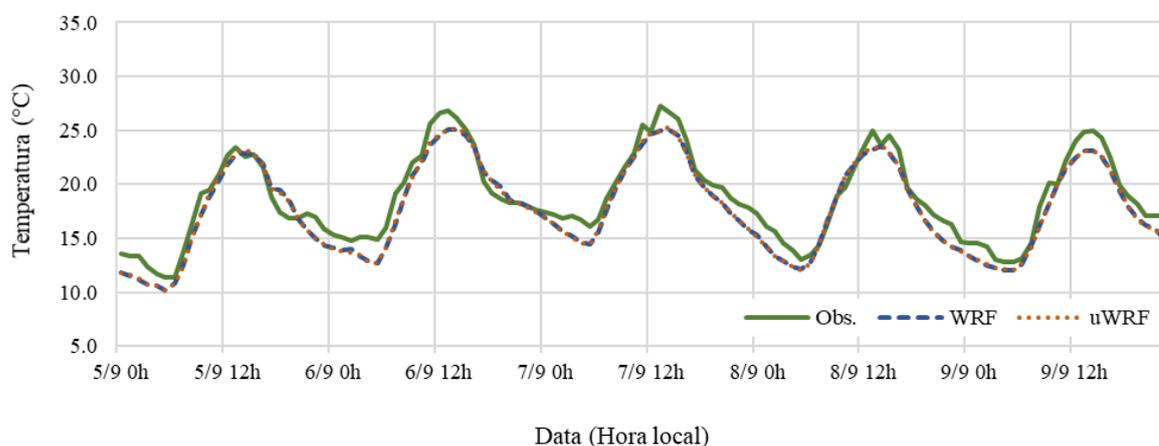


Tabela 17: Indicadores estatísticos para a temperatura a 2m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.

Índice	Benchmark	WRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (°C)	$\leq \pm 0.50$	1.01	0.64	-0.25	0.12	-1.01
MAGE (°C)	≤ 2.00	1.50	1.05	0.76	0.96	1.18
IOA	≥ 0.80	0.97	0.98	0.99	0.98	0.97
Índice	Benchmark	uWRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (°C)	$\leq \pm 0.50$	1.09	0.83	-0.66	0.55	-0.98
MAGE (°C)	≤ 2.00	1.62	1.39	1.04	1.04	1.15
IOA	≥ 0.80	0.96	0.96	0.98	0.98	0.97

Observa-se para a estação de Sete Lagoas que a parametrização aplicada foi responsável por produzir vieses médios (MB) positivos em valores superiores àquele sugerido pelo *benchmark*, tanto para a modelagem padrão quanto na urbana. A partir da série temporal na Figura 32, verifica-se que as superestimativas estão relacionadas às limitações de reprodução das temperaturas mínimas noturnas pelo modelo. Apesar de o uso e ocupação do solo ter sido mantido como natural após a atualização realizada e o BEP não ter sido ativado para tal célula, verifica-se que a sua aplicação em células adjacentes foi capaz de gerar diferenças significativas entre as simulações padrão e urbana, segundo o teste de Wilcoxon ($p = 0,03$), e uma piora dos índices estatísticos (aumento do MB e MAGE, além da diminuição do IOA).

Para a estação de Confins, observa-se que as temperaturas mínimas já foram melhor modeladas, enquanto as máximas foram superestimadas, contribuindo para os vieses fora das faixas de referência. Após a atualização da situação da mancha urbana, a célula em que se localiza o Aeroporto foi classificada como uma LCZ 2, para a qual o BEP foi ativado. Considerando a vista superior da região no software do Google Earth, é possível perceber que esta é uma localidade bastante heterogênea, em que há a coexistência das amplas e altas estruturas referentes ao Aeroporto e de construções baixas e espaçadas do distrito de Confins, que podem ser enquadradas como uma LCZ 6. Como os detalhes são perdidos na ocasião de interpolação para a grade de 1 km do modelo, o uso e ocupação do solo resultante acabou por maximizar as condições de adensamento e verticalização da localidade e isso refletiu nos índices estatísticos.

Observa-se que após o esforço conjunto da atualização equivocada do solo e ativação do BEP, os picos fornecidos pela simulação urbana na Figura 33, tornaram-se ainda mais pronunciados do aqueles gerados pela modelagem padrão. Tal tendência pode ter sido ocasionada pela consideração do efeito de aprisionamento da radiação. Como citado no estudo de Hamdi e Schayes (2008), o aumento da razão H/W pode dificultar o escape da radiação solar e de onda longas para o espaço, ocasionando em um aumento da temperatura. Cabe ressaltar, então, que a escala para a qual são interpoladas as informações urbanas pode ser um dificultador no processo de predição das variáveis meteorológicas.

Para a estação da Pampulha, foi verificado que o viés produzido pela modelagem padrão se tornou ainda mais negativo (de $-0,25^{\circ}\text{C}$ para $-0,66^{\circ}\text{C}$), discordando dos limites recomendados pelo *benchmark*, além de um aumento do MAGE. Pela observação da série temporal na Figura

34, vê-se que a predição das temperaturas mínimas noturnas tornou-se pior, levando a uma subestimativa da temperatura, com diferenças significativas entre as versões padrão e a urbana ($p = 0,000$). Tal localidade também teve seu uso e ocupação atualizados pela LCZ. Anteriormente classificada como uma célula urbana pelo MODIS passou a ser representada como uma área de construções baixas e abertas (6), o que pode ter contribuído para o viés mais negativo encontrado e as temperaturas noturnas mais amenas. Como o módulo urbano é capaz de considerar a vegetação urbana nas cidades, possivelmente a energia líquida antes utilizada no aquecimento do ar ou armazenada no solo durante o período do dia, passou a ser parcialmente dissipada como calor latente, controlando não somente a temperatura diurna mas também a noturna. Ressalta-se, porém que a estação da Pampulha está localizada em uma área também bastante heterogênea, com vegetação densa e construções de diferentes características, para a qual a atribuição como LCZ 6 parece não ter sido a mais adequada.

Para a estação de Ibirité, o uso e ocupação do solo foi mantido e as diferenças checadas entre as simulações não foram consideradas significativas ($p = 0,072$). Observa-se que o modelo subestimou as temperaturas mínimas e máximas, em média, em -1°C , embora ainda dentro dos limites aceitáveis para o MAGE e o IOA. É possível observar ainda que quanto maior a amplitude térmica dos dados observados, maior é a tendência de aumento do erro associado aos dados modelados. As maiores amplitudes verificadas estão justamente relacionadas àquelas estações para as quais foram verificados os maiores MAGEs: $21,6^{\circ}\text{C}$ em Sete Lagoas e $15,9^{\circ}\text{C}$ em Ibirité, frente aos erros médios (simulação padrão e urbana) associados de $1,6^{\circ}\text{C}$ e $1,2^{\circ}\text{C}$, respectivamente. É importante ressaltar que os erros não são dependentes exclusivamente da parametrização selecionada, mas de outros fatores relacionados à resolução dos dados de entrada, à simplificação dos processos atmosféricos, além das limitações dos métodos numéricos utilizados na solução das equações diferenciais (WYSZOGRODZKI *et al.*, 2013).

Com relação aos índices de concordância, observa-se que todas as simulações atenderam aos limites considerados aceitáveis para a temperatura, ainda que os valores de referência para o viés médio tenham sido excedidos. É importante ressaltar que a obtenção de índices de concordância com valores satisfatórios, apesar das diferenças entre os dados modelados e observados, deve-se ao fato de que tal índice também é sensível à diferença entre os dados observados e sua respectiva média, conforme o segundo termo do denominador da Eq. 17, o que faz com que os erros da modelagem associados a dados eventualmente mais dispersos sejam minimizados, como é o caso da estação de Ibirité.

Por fim, para a estação de Cercadinho foi obtido que a modelagem padrão apresentou melhores resultados que a modelagem urbana, para a qual foram verificados maiores viés e erro, ainda que dentro dos limites do *benchmark*. Após a reclassificação de tal célula como uma LCZ 2 e a ativação do BEP, as temperaturas máximas discordaram significativamente tanto dos dados modelados pelo WRF quanto dos dados observados. Novamente, observa-se que o uso e ocupação do solo em tal área é complexa, como pode ser observada na Figura 28, em que se tem uma região vegetada cercada por zonas urbanas. Aqui, pode ter contribuído para o viés positivo, o mesmo efeito mencionado na estação de Confins.

É esperado a partir da aplicação do BEP que exista uma melhoria na estimativa das condições meteorológicas das áreas urbanas, devido à utilização de uma formulação mais completa dos processos que nela ocorrem. Porém, como visto, tanto a classificação do uso e ocupação do solo quanto os dos parâmetros do cânion urbano adotados devem ser os mais representativas possível da situação real, de modo a evitar a indução do modelo ao erro. Além disso, como Jänicke *et al.* (2016) demonstraram para Berlim, na Alemanha, pode ser possível que o aumento da complexidade dos modelos que representam as áreas urbanas funcionem mais como fonte de erro do que de precisão.

5.2.2 Umidade específica do ar a 2 m

Os dados modelados de umidade específica do ar próximo à superfície para as estações de Sete Lagoas, Confins, Pampulha, Cercadinho e Ibirité são apresentados nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41, respectivamente. Já os índices estatísticos, calculados em função dos dados observados, encontram-se na Tabela 18. Destaca-se que a estação do aeroporto de Confins é mantida para fins de navegação aérea e portanto não monitora a umidade relativa como as outras estações. Assim, o cálculo da umidade específica foi feita com base em outras variáveis disponíveis, segundo equações apresentadas em Stull (2011).

Figura 37: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática da Sete Lagoas.

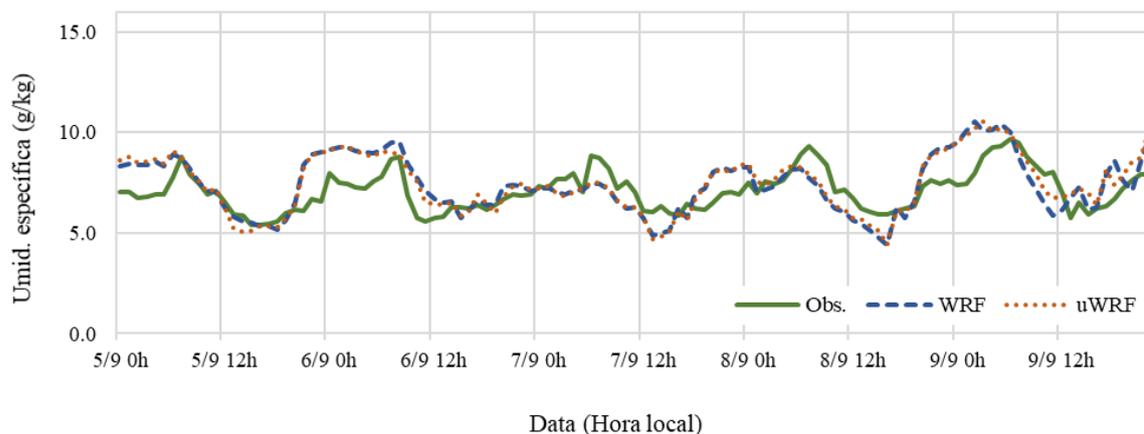


Figura 38: Séries horárias de umidade específica calculada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Confins.

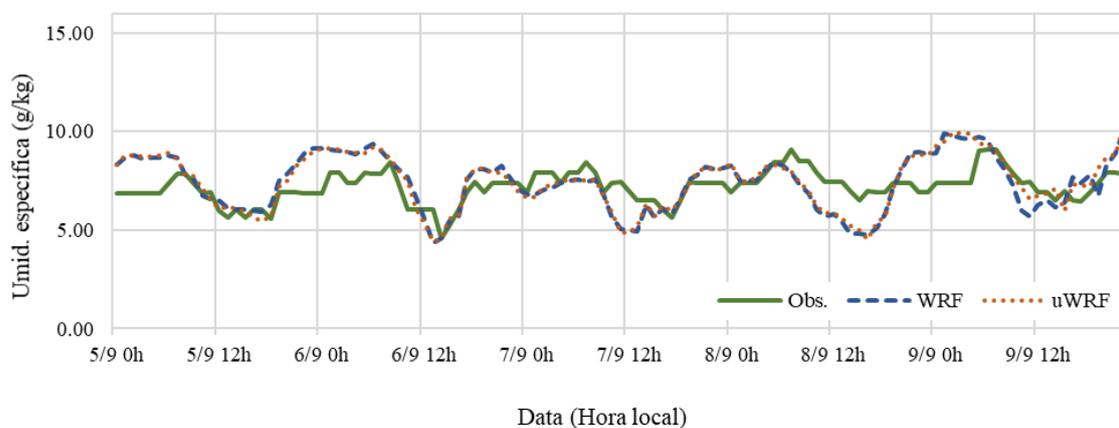


Figura 39: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Pampulha/BH.

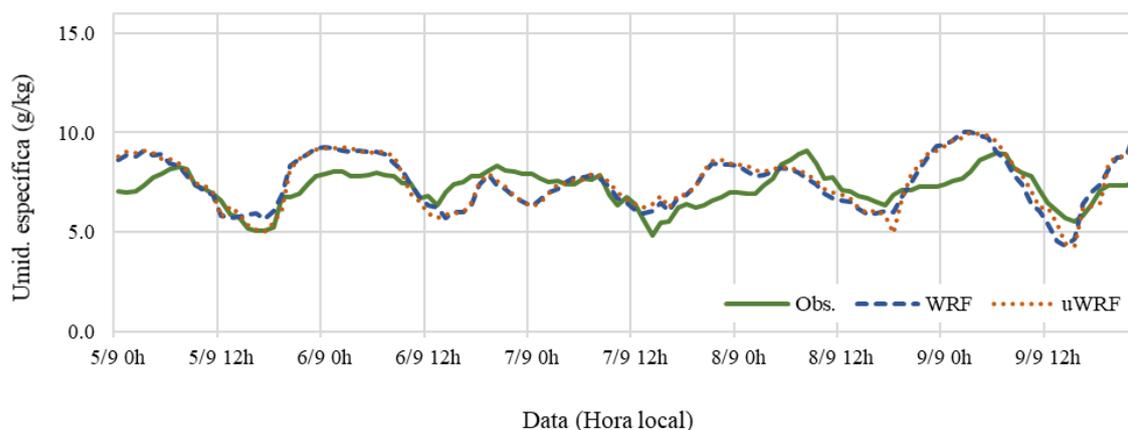


Figura 40: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Cercadinho/BH.

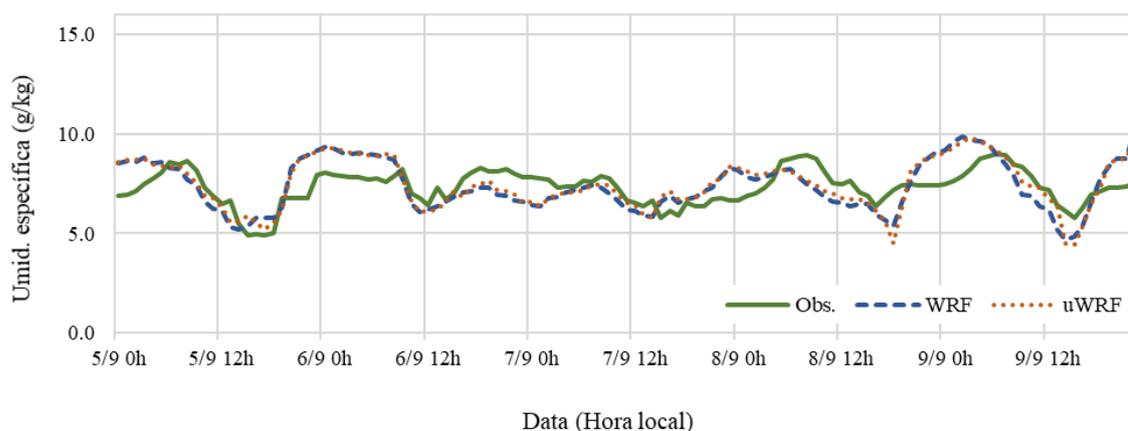


Figura 41: Séries horárias de umidade específica observada e modelada pelo WRF padrão e urbano para a estação automática de Ibirité (Rola Moça).

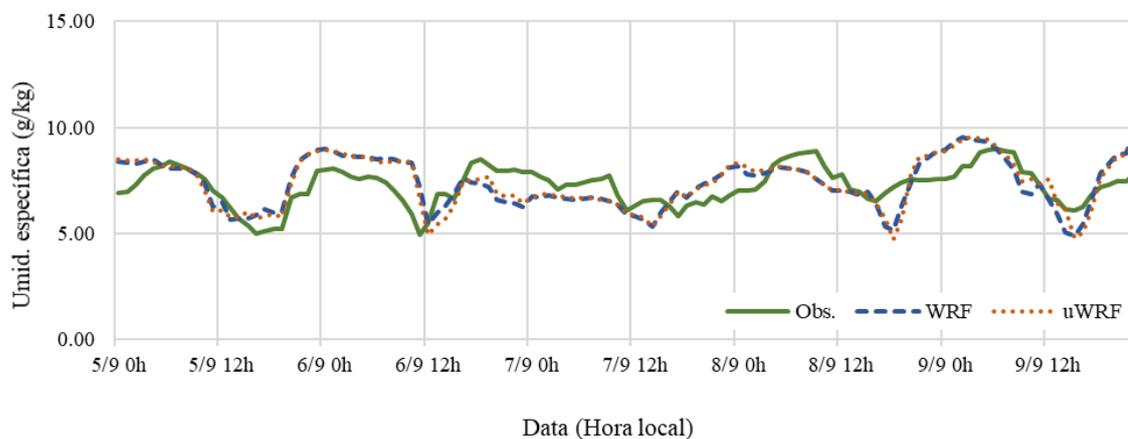


Tabela 18: Indicadores estatísticos para a umidade específica a 2m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.

Índice	Benchmark	WRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (g.kg ⁻¹)	≤± 1.00	0.32	0.30	0.29	0.07	0.11
MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.94	0.99	0.90	0.94	0.84
IOA	≥ 0.60	0.75	0.64	0.73	0.71	0.74
Índice	Benchmark	uWRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (g.kg ⁻¹)	≤± 1.00	0.36	0.33	0.33	0.15	0.12
MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.90	0.94	0.89	0.86	0.83
IOA	≥ 0.60	0.77	0.66	0.75	0.73	0.76

Com relação as séries temporais, observa-se, inicialmente, que a umidade específica do ar dos dados observados apresenta valores mais elevados durante as primeiras horas do dia até o início do período de maior insolação, em torno do meio-dia, a partir do qual o aumento da temperatura favorece a capacidade do ar em reter vapor, com a subsequente queda da umidade específica no período vespertino. Após o pôr do sol, com a atenuação da temperatura, tais valores voltam a se elevar, repetindo o ciclo diário. Em termos médios, as estações apresentaram umidades específicas que variaram entre 7,1 e 7,4 g.kg⁻¹ (média horária).

Observa-se na Tabela 18, para os dados modelados, que todos os índices estatísticos foram atendidos, indicando que a umidade específica foi satisfatoriamente reproduzida durante o período de estudo, com tendências à superestimativa. O teste de Wilcoxon somente apontou diferenças significativas entre as modelagens padrão e urbana nas estações de Cercadinho e Pampulha ($p = 0,000$ e $p = 0,003$, respectivamente).

É importante ressaltar que os fluxos calculados pelo uWRF consideram que a célula urbana tem somente certa fração ocupada pelas cidades, para a qual o BEP é aplicado, sendo o restante vegetado e tratado pelo modelo de superfície terrestre Noah LSM. Assim, é possível que a fração vegetada contida nas células urbanas em que se localizam as estações da Pampulha, Cercadinho e Confins possam ter contribuído com a adição de água na atmosfera, justificando os vieses mais positivos.

5.2.3 Vento a 10 m

As métricas relativas à velocidade e a direção dos ventos observados e modelados são apresentadas na Tabela 19 e Tabela 20, respectivamente.

Tabela 19: Indicadores estatísticos para a velocidade do vento a 10m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.

Índice	Benchmark	WRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (m.s ⁻¹)	≤± 0.50	1.93	1.03	2.06	0.20	3.18
RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.63	2.15	2.89	1.78	4.13
Índice	Benchmark	uWRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (m.s ⁻¹)	≤± 0.50	2.00	-1.50	-0.16	-3.72	3.06
RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.74	1.90	0.89	4.07	4.01

Tabela 20: Indicadores estatísticos para a direção do vento a 10m para as estações meteorológicas inseridas na RMBH.

Índice	Benchmark	WRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (°)	$\leq \pm 10.00$	-16.53	11.82	-10.64	-11.98	19.77
MAGE (°)	≤ 30.00	46.03	33.94	24.46	21.25	28.65
Índice	Benchmark	uWRF				
		Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
MB (°)	$\leq \pm 10.00$	-18.23	11.19	-8.38	-13.29	19.51
MAGE (°)	≤ 30.00	44.27	36.26	24.63	24.63	28.25

Observando-se as métricas da modelagem padrão referentes à velocidade do vento, tem-se que a maioria dos *benchmarks* foram excedidos, indicando que a tendência da parametrização escolhida é a de superestimativa. Shimada *et al.* (2011) afirmam que como as simulações em tais modelos fazem o uso de informações topográficas grosseiras, as feições do relevo não são reproduzidas de forma fidedigna, sendo consideradas mais suaves do que são na realidade, o que frequentemente resulta na superestimativa da velocidade do vento próximo à superfície.

Após a ativação do BEP, porém, foi verificado para as células urbanas (Confins, Pampulha e Cercadinho) a obtenção de um viés negativo. O módulo urbano possibilita o cálculo de forças de fricção, gerada pela presença de superfícies horizontais como o assoalho e os telhados, e forças de arraste, provocadas pela intercepção do vento por superfícies verticais (paredes dos prédios e construções), ambas contribuindo como sumidouros de momentum (MARTILLI *et al.*, 2002). Na formulação desta última, a força induzida pela presença dos edifícios é ortogonal à direção do cânion e tem um componente contra a direção horizontal do vento (MARTILLI *et al.*, 2002), o que contribui para a redução da velocidade. A predição da velocidade do vento para a estação da Pampulha apresentou melhora significativa com o uso da versão urbana do WRF, apresentando uma redução no MB e no RMSE.

Já para a estação de Cercadinho os dados não seguiram a mesma tendência, existindo uma piora expressiva do erro e do viés. Suspeita-se que tais resultados tenham sido em decorrência da classificação inadequada da área como LCZ 2, como discutido anteriormente. Nas condições reais de uso e ocupação do solo, tal estação está inserida em uma área de vegetação baixa cercada por áreas urbanas. Após a interpolação da classificação LCZ com resolução de 100 m para a grade de 1 km² do modelo, tais detalhes foram perdidos levando à consideração do fragmento como urbano com prédios de média altura, o que pode ter ocasionado na subestimativa da velocidade.

O mesmo ocorre para a estação de Confins, que após a troca da classificação para uma LCZ 2, passou a apresentar um MB negativo ($-1,50 \text{ m.s}^{-1}$), indicando que tal classe não reproduz as características reais da zona urbana em questão, o que é bastante razoável já que Confins é uma área de aeroporto, de baixa densidade demográfica. Apesar dos dados simulados terem apresentado uma piora no MB, o índice de erro apresentou uma leve melhora indicando que o esforço conjunto de atualização do solo e de ativação do BEP pode ser promissor na predição do vento em tal região.

Com relação à modelagem da direção do vento, os resultados encontrados foram bastante variáveis. Para a simulação padrão, a parametrização escolhida somente apresentou erros médios satisfatórios para três localidades, Pampulha, Cercadinho e Ibitié. Para a estação de Sete Lagoas, a parametrização selecionada culminou na apresentação de erros médios absolutos de quase 50° . Após a ativação do BEP, o viés negativo apresentado pela estação da Pampulha foi reduzido, se enquadrando na faixa proposta pelo *benchmark*, apesar de um pequeno aumento do erro. Para as estações de Confins e Cercadinho, é possível que a má classificação do solo, como dito anteriormente, tenha prejudicado a predição do vento.

É importante ressaltar que na ocasião de preenchimento da tabela do BEP, assumiu-se que as ruas dos cânions urbanos possuiriam somente orientação de 0° e 90° , o que é uma consideração bastante simplista em vista dos cenários possíveis. Tal adoção também pode ter contribuído para uma estimativa equivocada da orientação do vento próximo à superfície, principalmente nas áreas urbanas consideradas mais verticalizadas (LCZ 1 e LCZ 2).

A obtenção de desempenhos particularmente ruins na representação do vento é um resultado recorrente também em diversos outros estudos, como os de Reboredo *et al.* (2015) e Solbakken e Birkelund (2018). Na validação do WRF para a RMBH observou-se, inclusive, que tal tendência se manteve ainda que outras parametrizações tenham sido aplicadas, o que revela a necessidade de se focar em outros aspectos da modelagem fora das configurações físicas, como as resoluções dos dados de caracterização de superfície para melhorar o desempenho do modelo, principalmente em regiões de topografia complexa como é o caso desta região de estudo (NEDBOR-GROSS *et al.*, 2017).

Para uma observação mais detalhada da variável, também foram plotadas rosas dos ventos medidos e modelados (Figura 42 a 45). As cores indicam a velocidade do vento, conforme descrito na legenda. A direção é dada pelo ângulo formado pelo vetor e o eixo norte (0°), sendo

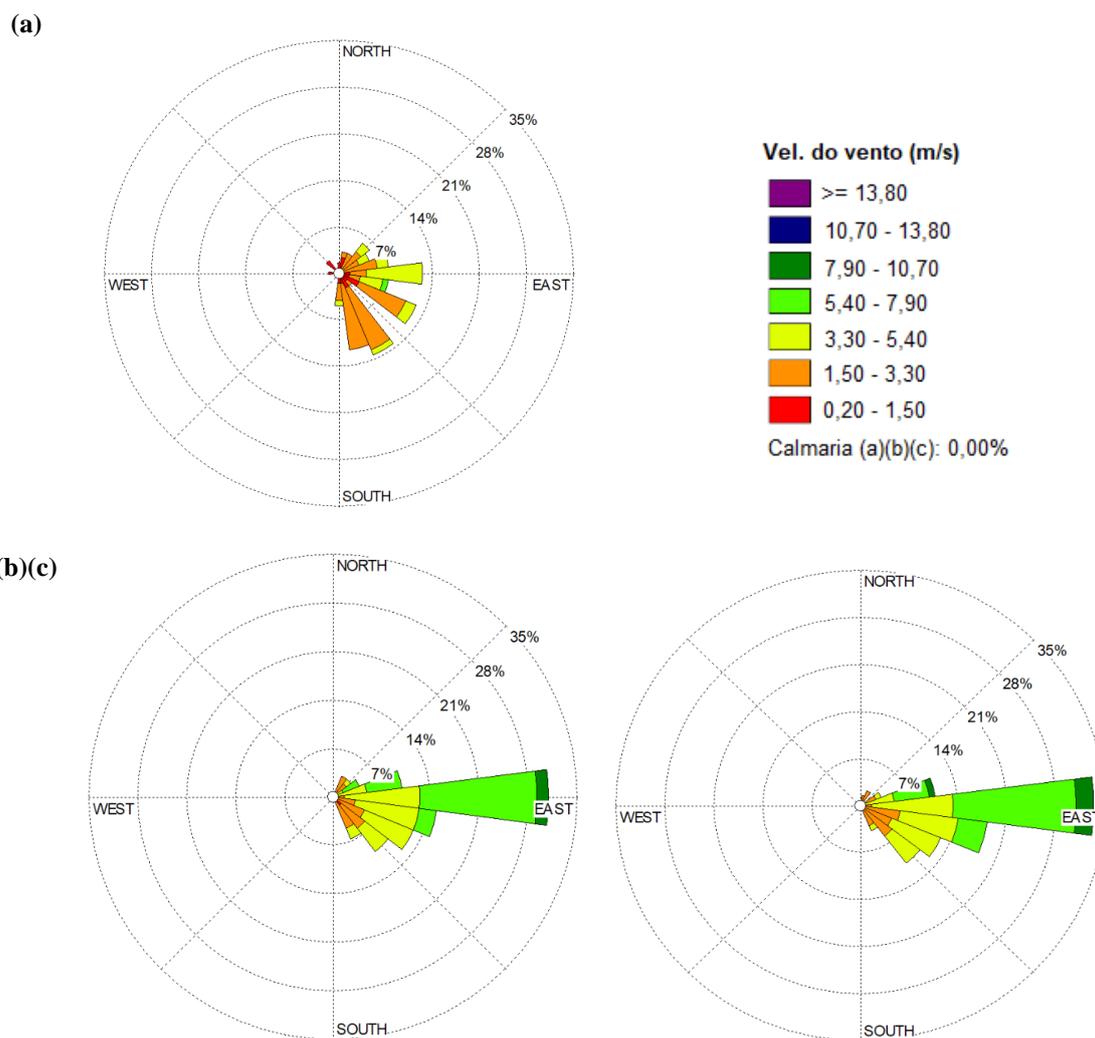
positivo no sentido horário. A direção ilustrada é aquela de onde sopram os ventos, considerando a respectiva estação como o centro da rosa. Os círculos concêntricos indicam a porcentagem de ocorrência de cada direção do vento (norte, sul, leste e oeste). Para calcular a frequência de uma determinada faixa de velocidade pertencente a um determinado vetor basta fazer a diferença entre as porcentagens que delimitam cada faixa de cor. As rosas dos ventos somente apresentam a mesma escala de frequência entre si. Dado a heterogeneidade dos dados entre as estações, não foi possível a adoção de uma escala única, uma vez que prejudicaria a visualização dos vetores.

Percebe-se que para a região de Sete Lagoas (Figura 42) os ventos observados possuem baixa velocidade (média de 2,35 m/s), sendo as bafagens (1,50 – 3,30 m.s⁻¹) presentes em 25,8% do tempo, e as aragens (3,30 – 5,40 m.s⁻¹), 52,5% do tempo. Predominantemente, nesta região, os ventos sopram dos setores sul-sudeste (SSE) e leste-sudeste (ESE). Percebe-se, porém, que o padrão de ventos modelados é bastante distinto daquele que foi observado, principalmente em termos de direção, como indicado pelos valores de MAGE de 46,03° e 44,27° para as simulações padrão e urbana, respectivamente.

As velocidades modeladas também foram superestimadas, como indicado pelos vieses, apresentando-se, em média, 1,8 vezes superior àquelas observadas na estação meteorológica. A classe de velocidade mais frequente foi a de ventos fracos provenientes do setor ESE e de ventos moderados na direção leste (E), tanto na versão padrão quanto na urbana. Jiménez e Dudhia (2013), em um estudo para a Península Ibérica, observaram que as diferenças para a direção do vento entre os dados modelados e os medidos são tão maiores quanto menores forem a velocidade do vento na superfície. Vento com velocidades superiores apresentam um padrão de circulação mais definido, o que facilita a sua reprodutibilidade pelo modelo.

Além da predominância de baixas velocidades, é importante ressaltar que a estação de Sete Lagoas é a que se encontra mais próxima da borda do domínio, podendo sofrer com a influência das condições de fronteira. Tanto para a velocidade quanto para a direção não foram verificadas diferenças significativas entre as simulações padrão e urbana ($p = 0,204$ e $p = 0,922$, respectivamente).

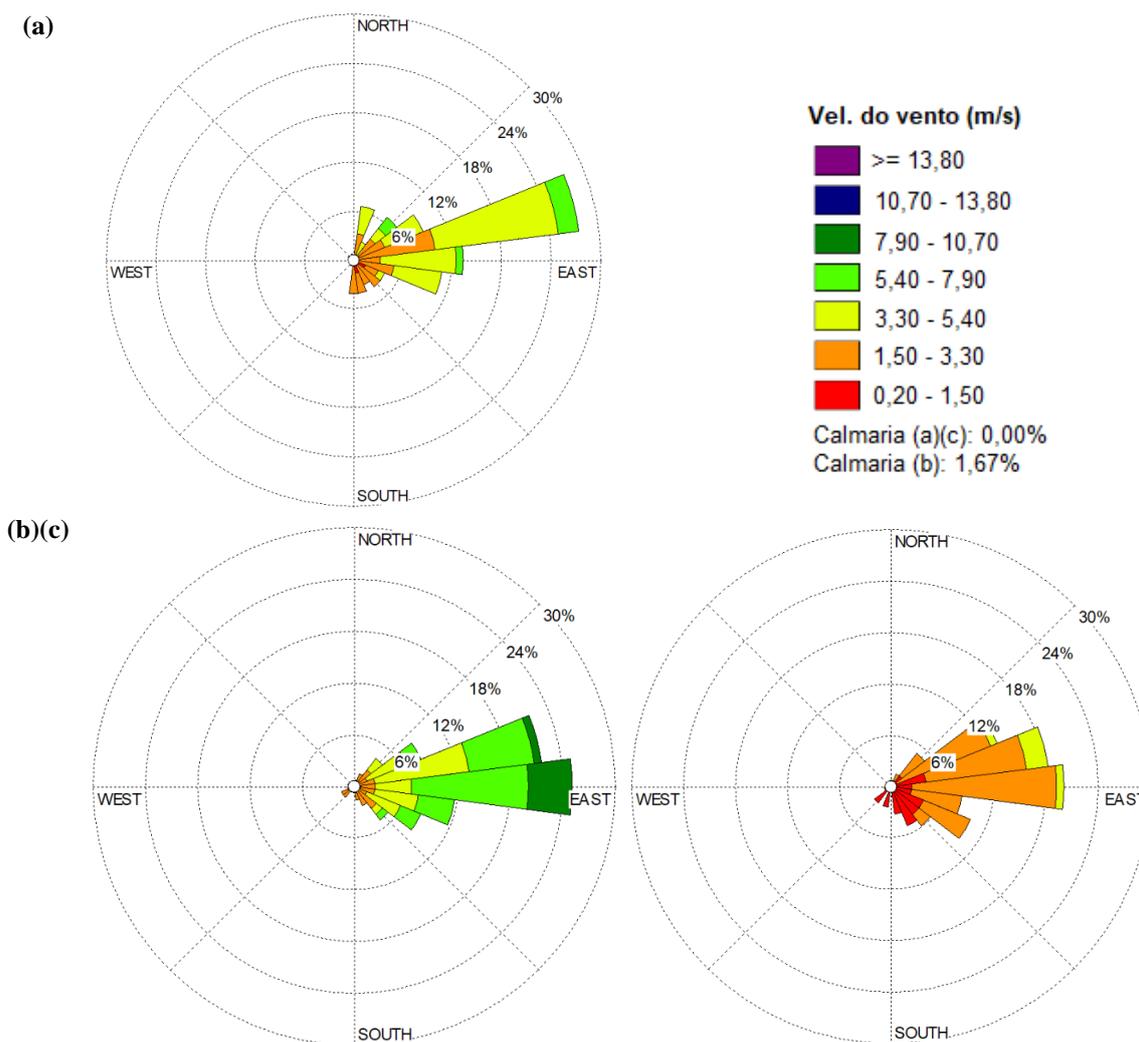
Figura 42: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Sete Lagoas.



Para a estação de Confins (Figura 43), as velocidades observadas apresentaram média de $3,31 \text{ m.s}^{-1}$. Verificou-se a predominância de ventos de aragem (44,2%) e ventos fracos (42,5%), provenientes, mais frequentemente, do setor norte-nordeste (NNE). Com a ativação do BEP para a localidade, observa-se que as rosas dos ventos produzidas pelas versões padrão e urbana apresentaram diferenças entre si muito mais pronunciadas que as do caso anterior. Como esperado para a versão padrão e já discutido anteriormente, a velocidade do vento foi superestimada produzindo uma média de $4,33 \text{ m.s}^{-1}$, 2,4 vezes superior à estimada pela modelagem urbana. Para a primeira, os ventos predominantes são fracos (31,7%) e moderados (30,0%), enquanto para a segunda, classificam-se como bafagem (57,5%) e aragem (37,5%).

Quanto à direção, foram previstos, por ambas as simulações, vetores provenientes do eixo leste de maior magnitude e frequência do que observado, enquanto alguns ventos de baixa velocidade vindo de norte e sul não foram representados. Observa-se que a atualização do solo para a LCZ 2 parece ter influenciado pouco na direção do vento, tendo sido mais relevante na redução de sua velocidade. O teste de Wilcoxon indicou a existência de diferenças significativas somente para a velocidade ($p = 0,000$).

Figura 43: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Confins.

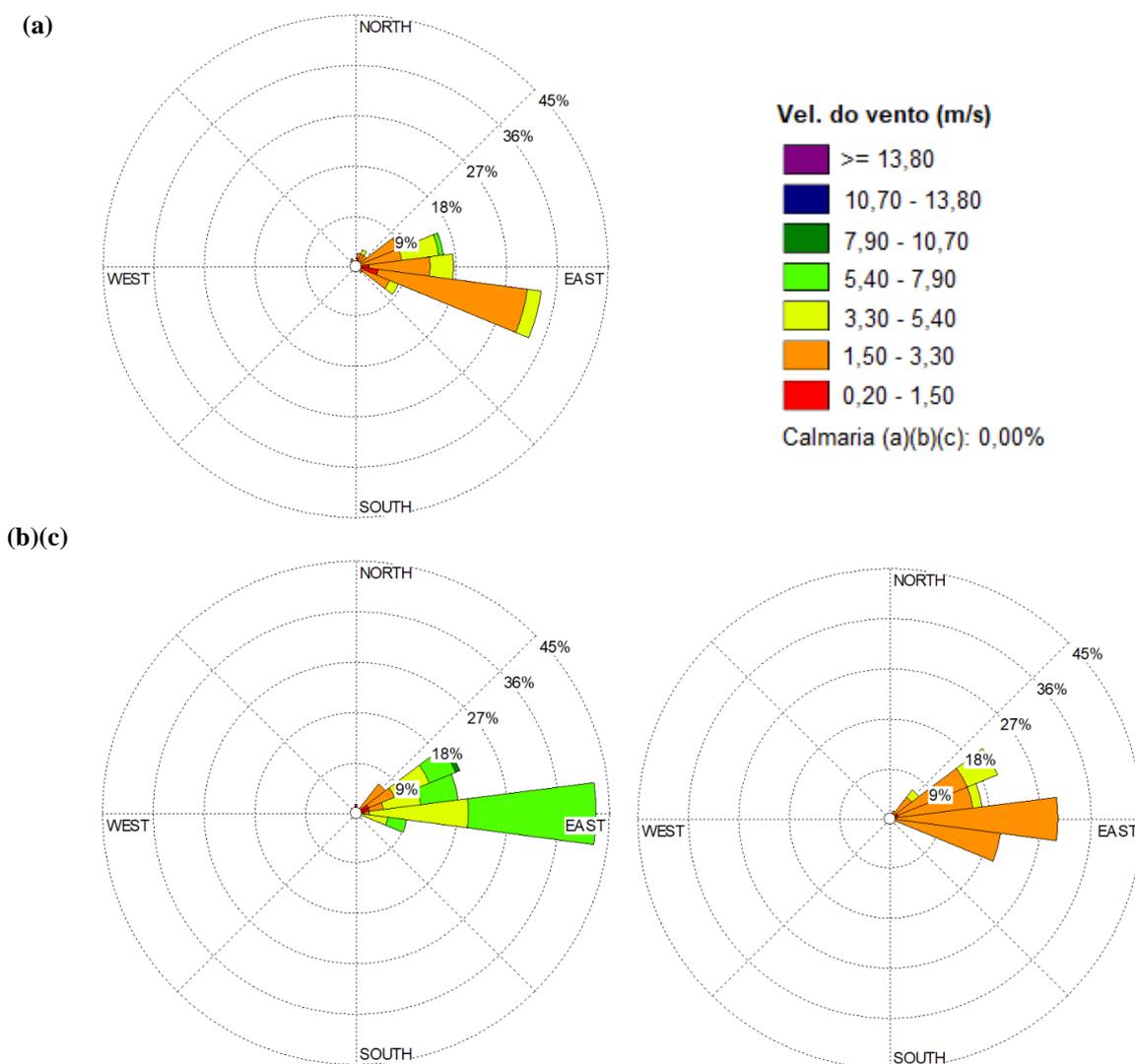


Em relação a estação da Pampulha (Figura 44), a característica principal apresentada pelos dados observados é a ocorrência de ventos de baixa velocidade (entre $0,20 - 5,40 \text{ m.s}^{-1}$), com médias de $2,51 \text{ m.s}^{-1}$. Para esta localidade, percebe-se uma melhor adequação entre os dados medidos e aqueles modelados. As direções de vento predominantes soprados dos setores leste-

nordeste (ENE) e leste-sudeste (ESE) foram bem reproduzidas pelo modelo em termos de direção, não existindo diferença significativa entre as simulações padrão e urbana ($p = 0,06$).

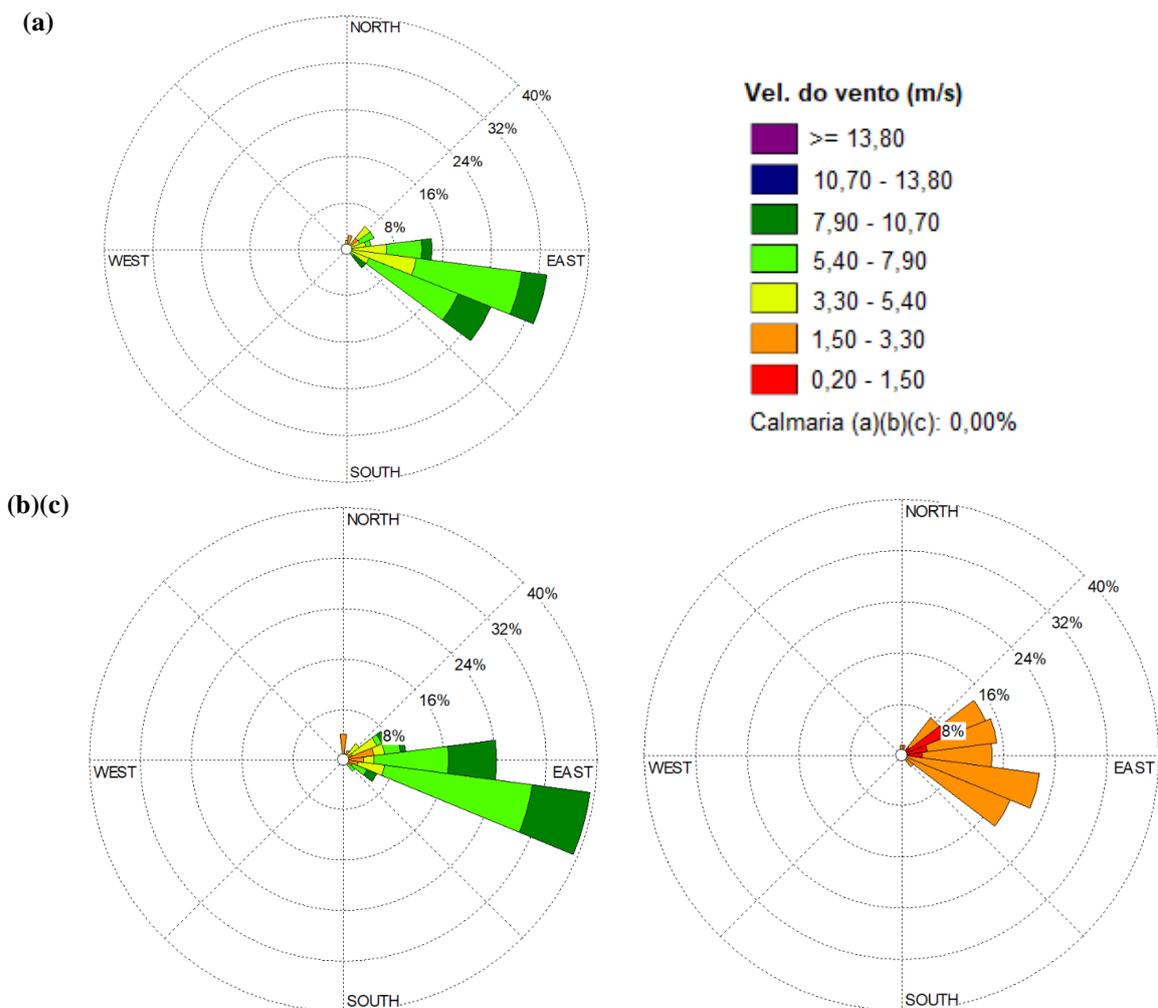
O uWRF também foi capaz de reduzir o viés positivo da velocidade da simulação padrão, de $2,16 \text{ m.s}^{-1}$ para $-0,16 \text{ m.s}^{-1}$, como já citado. A velocidade média apresentada para a primeira foi de $2,34 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto para a segunda foi de $4,55 \text{ m.s}^{-1}$. Os ventos mais recorrentes na simulação pelo uWRF foram as aragens (permanência de 81,7%) e pelo WRF, os ventos fracos e moderados (74,2%). Para a velocidade, o teste estatístico de Wilcoxon apontou a existência de diferenças significativas entre as duas versões do modelo ($p = 0,000$).

Figura 44: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Pampulha.



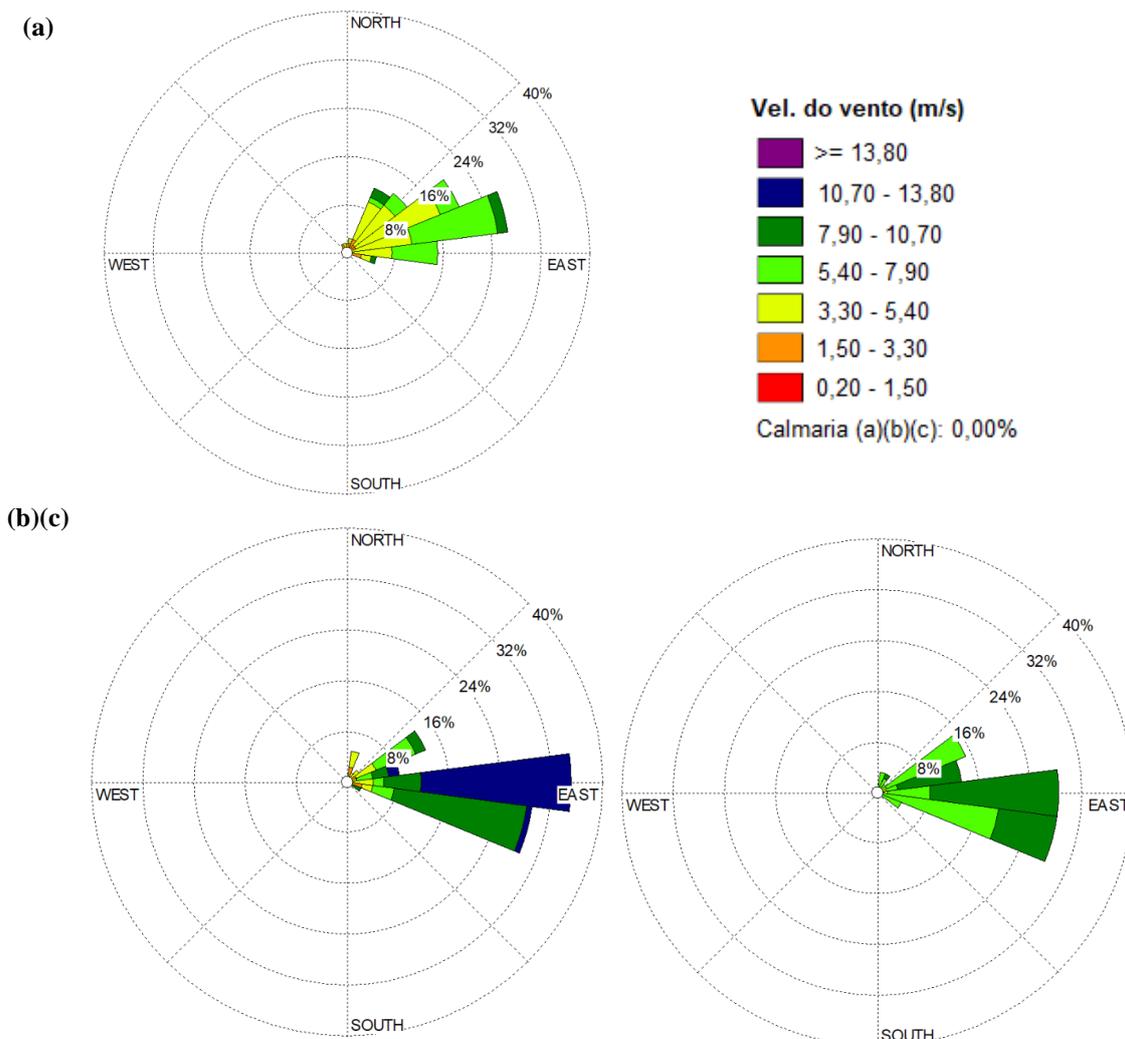
Observando-se as rosas dos ventos para a estação de Cercadinho (Figura 45) é possível perceber que a simulação padrão foi capaz de reproduzir melhor a velocidade e a direção do vento do que a versão urbana. As classes de velocidade ($5,40 - 7,90 \text{ m.s}^{-1}$) de maior permanência no tempo até mesmo apresentaram valores idênticos de 43,3%. Após a reclassificação do solo como LCZ 2 e ativação do BEP, porém, as métricas, como já discutido, apresentaram uma piora expressiva com uma significativa diminuição da velocidade (redução média de 64,6% em relação aos dados observados). Os ventos modelados predominantes foram as aragens, com frequência de 78,3%. Na modelagem do uWRF percebe-se ainda que houve um desvio na direção do vento, ocasionando no aparecimento de vetores no setor leste-nordeste (ENE) mais frequentes do que aqueles observados. O teste de Wilcoxon, entretanto, não apontou a existência de diferenças significativas na direção ($p = 0,105$), somente na velocidade ($p = 0,000$).

Figura 45: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Cercadinho.



Por fim, para a estação de Ibirité, apresenta na Figura 46, a tendência das modelagens foi de superestimar as velocidade do ventos com diferenças significativas entre as simulações padrão e urbana ($p = 0,000$). Na abordagem padrão predominam ventos de mais alta velocidade ($7,90 - 10,70 \text{ m.s}^{-1}$), os quais não foram observados nas condições reais. Já na abordagem urbana, o viés positivo da velocidade foi reduzido, com a predominância de ventos moderados ($5,40 - 7,90 \text{ m.s}^{-1}$) em 54% do tempo. As velocidade médias estimadas por ambas as versões foram de $7,97 \text{ m.s}^{-1}$ e $7,37 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente, em contraposição à velocidade observada de $4,84 \text{ m.s}^{-1}$. Já para as direções modeladas, foi verificado diferença significativa entre as versões padrão e urbana ($p = 0,029$), com estimativas de um vento predominantemente soprado de leste e leste-sudeste (ESE) em desacordo com os ventos observados provenientes, predominantemente, do setor leste-nordeste (ENE).

Figura 46: Rosa dos ventos a 10m com os (a) dados observados e os modelados pelo WRF versão (b) padrão e (c) urbana para a estação automática de Ibirité.



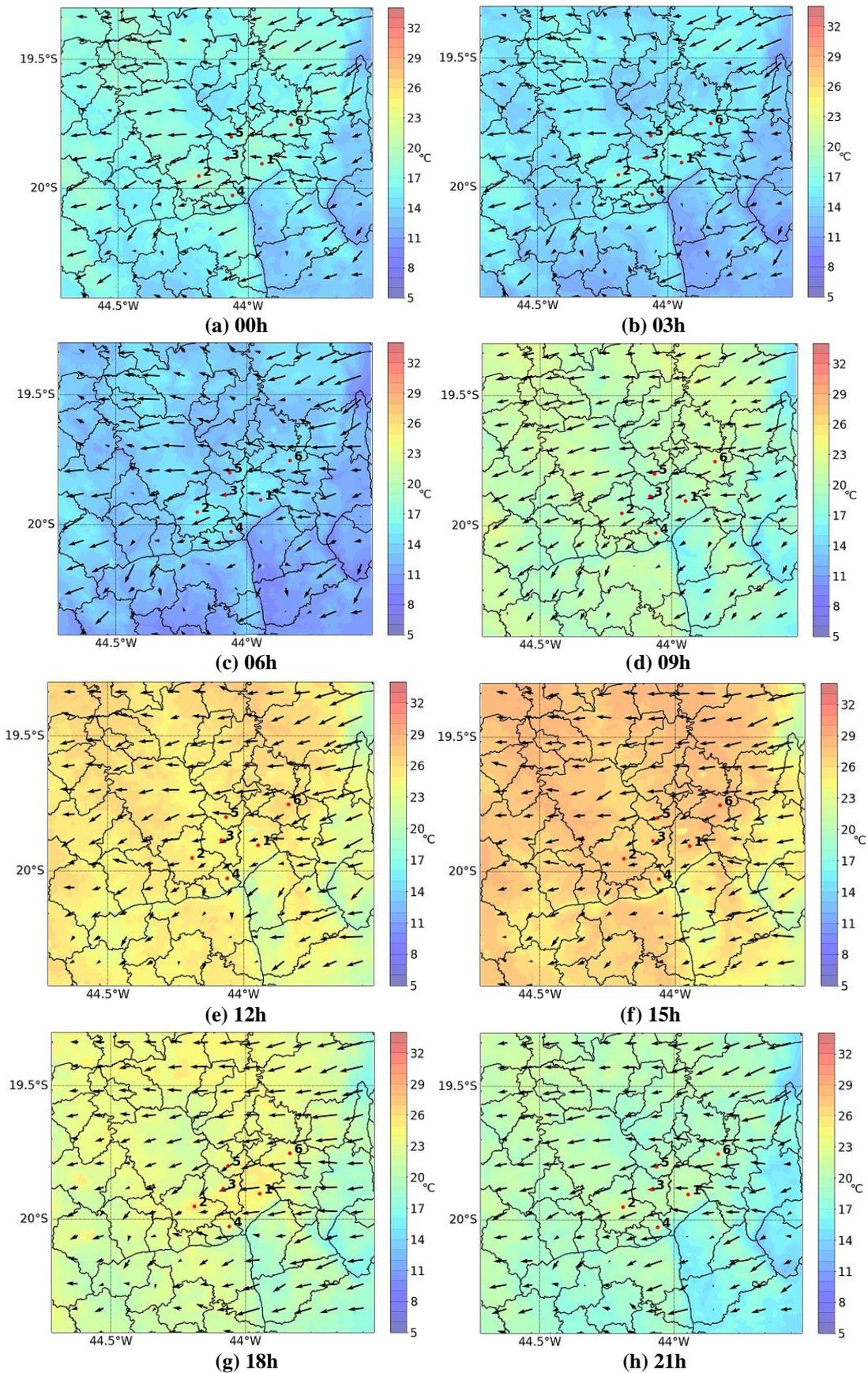
5.3 *Análise detalhada das diferenças entre os dados meteorológicos modelados pelo WRF padrão e urbano*

5.3.1 *Modelagem meteorológica padrão para temperatura e vento próximos à superfície*

Na Figura 47, podem ser observadas as médias dos horários sinóticos locais de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, para todos os dias do período de estudo, para a temperatura a 2m e vento a 10m, modelados pelo WRF padrão para a RMBH. Na figura foram plotados os centros dos municípios que se encontram conurbados com a capital, ou seja, fazem parte da mancha urbana contígua, de modo que seja possível observar, mais facilmente, as condições meteorológicas em tais regiões. É importante ressaltar que os centros dos municípios, porém, não são coincidentes com os centros das zonas urbanas, sendo estas mais concentradas nas fronteiras com Belo Horizonte.

Pela figura, é possível observar a predominância do vento de leste e nordeste na RMBH, devido a atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Sudeste (ASSIS, 2010), com a manutenção do padrão tanto durante o período diurno quanto noturno. Percebe-se também que existe a interação do fluxo com as regiões de maior altitude da área, localizadas à sul e sudoeste, para as quais são observadas uma deflexão do vento e zonas de estagnação, enquanto nas regiões de baixas altitudes da Depressão Sanfranciscana (à norte e nordeste), predominam as direções iniciais do fluxo. Tomando como referência os centros dos municípios plotados para norteamento da identificação das áreas urbanas, observa-se que o modelo em sua versão padrão não foi capaz de reproduzir a diminuição do vento sobre as cidades, levando à obtenção dos já referidos vieses positivos.

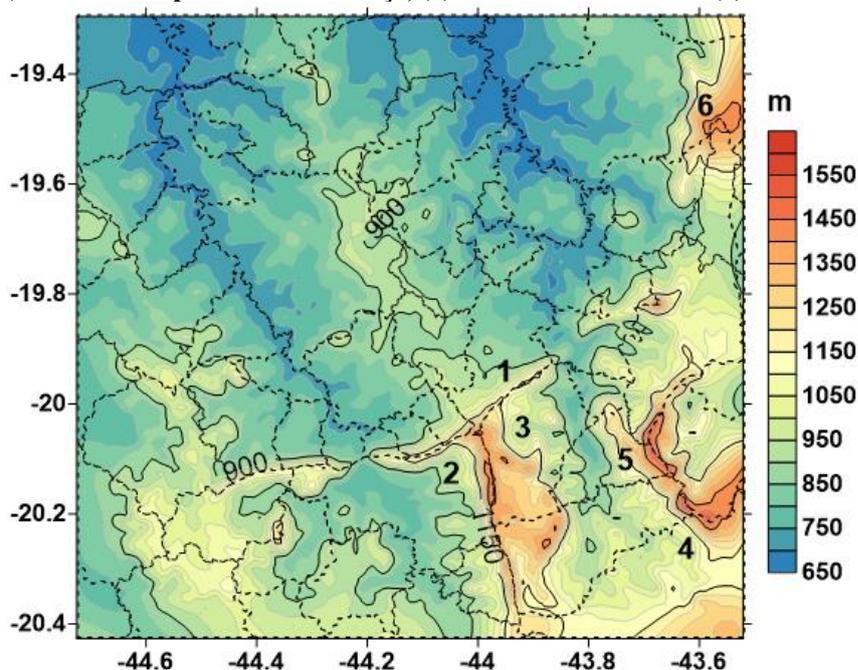
Figura 47: Média dos horários (locais) de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, respectivamente, para temperatura a 2m e vento a 10m modelados pelo WRF padrão para a RMBH, com destaque para as cidades de 1) Belo Horizonte, 2) Betim, 3) Contagem, 4) Ibirité, 5) Ribeirão das Neves e 6) Santa Luzia.



Nas plotagens também é possível observar a evolução da temperatura próxima à superfície. Para as horas disponíveis, verifica-se que as temperaturas mínimas ocorrem próximas ao nascer do Sol, às 06h, e as máximas, no período vespertino, às 15h, com grandes amplitudes térmicas neste período do ano (inverno). Assim como para o vento, a temperatura apresenta estreita relação com o relevo da RMBH. As menores temperaturas verificadas no domínio estão associadas às áreas de serras, como mostrado na Figura 48, a saber: (1) a Serra do Curral, com alinhamento nordeste-sudoeste; (2) a Serra da Moeda e (3) a Serra de Itabirito, na direção sul; (4) as Serras de Capanema e do Caraça, à sudoeste, próximo da borda; (5) a Serra do Gandarela, também à sudoeste; (6) e a porção oeste do extenso complexo da Serra do Espinhaço, à leste e nordeste (BAPTISTA, 2011; MINAS GERAIS, 2010).

Dependendo da orientação das serras e da época do ano, tais áreas também podem sofrer sombreamento, reduzindo a absorção de energia solar e a temperatura. Além dos elementos topográficos, uma significativa porção de tais áreas são protegidas, sendo classificadas em tipos de Unidades de Conservação, apresentando baixa ocupação antrópica e grande variedade de ecossistemas (BAPTISTA, 2011; MINAS GERAIS, 2010). Assim, a presença de vegetação também favorece a manutenção de temperaturas mais amenas, a partir da dissipação do calor em forma de calor latente.

Figura 48: Altimetria da RMBH e indicação das principais elementos topográficos, com a demarcação territorial dos municípios (linha pontilhada): (1) Serra do Curral, (2) Serra da Moeda, (3) Serra de Itabirito, (4) Serras de Capanema e do Caraça, (5) Serra do Gandarela e (6) Serra do Espinhaço.



Já nas regiões compreendidas entre as direções norte, sudoeste e o centro do domínio, onde se encontram concentradas as cidades, foram verificadas temperaturas mais altas, não sendo possível afirmar qual é a contribuição da presença da camada urbana, uma vez que as áreas suburbanas, mais vegetadas e de baixa densidade populacional, também apresentaram o mesmo padrão de aquecimento. Com o objetivo de verificar qual é o efeito da introdução de um modelo de dossel urbano na representação dos processos físicos que ocorrem nas cidades, serão analisados, no item seguinte, as diferenças de temperatura do ar, além dos fluxos de energia, de modo a permitir a identificação das modificações no equilíbrio radiativo e térmico da superfície.

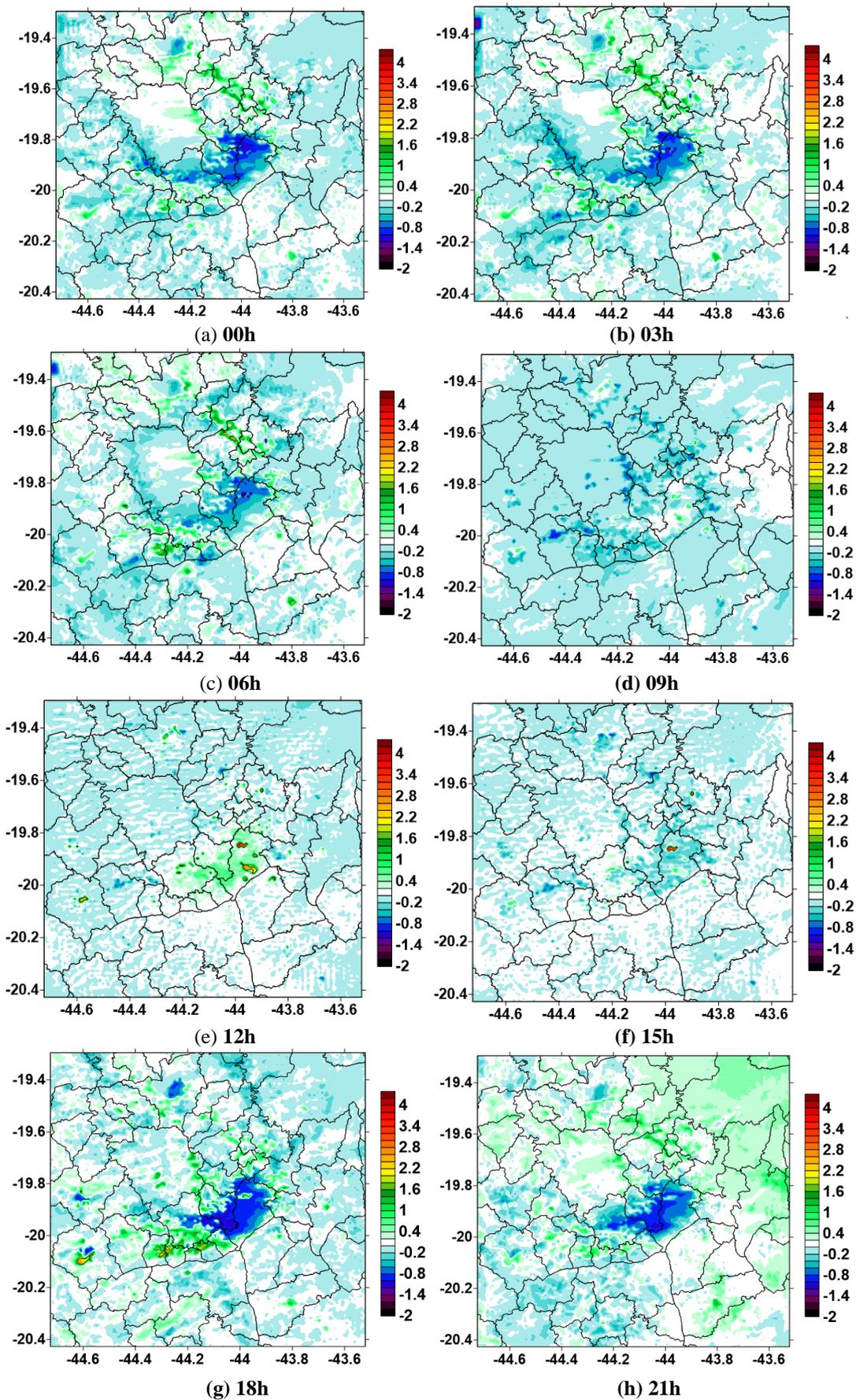
5.3.2 Análise horizontal do efeito da ativação do módulo urbano na temperatura próxima à superfície e fluxos de energia superficiais

Na Figura 49, encontram-se as diferenças de temperaturas a 2m horárias médias, para todo o período de estudo (05 a 09/09/17), entre o uWRF e o WRF ($T_{uWRF} - T_{WRF}$), para os horários locais de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h. No centro das imagens, encontra-se concentrada a porção urbana da RMBH. A princípio, a ativação do BEP produziu efeitos distintos na área estudada, dependentes, principalmente, do uso e ocupação do solo e do período do dia.

Durante o período diurno, observa-se que as diferenças produzidas na área urbana pela ativação do BEP são de menor magnitude do que durante a noite. Aparentemente, durante o dia as diversas classes de uso e ocupação do solo urbanas não são capazes de provocar padrões distintos na temperatura próxima a superfície, devido às condições de instabilidade provocadas pela irradiação solar, impedindo a estratificação da atmosfera e o desenvolvimento do clima urbano.

Contudo, durante o meio-dia, é possível observar um núcleo de aquecimento na região centro-sul de Belo Horizonte, classificada como LCZ 1. Em função do alto grau de adensamento e verticalização desta área é possível que as maiores temperaturas possam ter sido ocasionadas pelo fenômeno de aprisionamento de radiação. As diferenças observadas apresentaram um valor máximo de 2,9°C. Nas demais regiões da RMBH, tais efeitos não foram constatados uma vez que grande parte da região foi classificada em LCZs não verticalizadas.

Figura 49: Diferença da temperatura a 2m horária média (°C) entre o uWRF e o WRF para 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h (horário local).



Percebe-se, também, que para as porções urbanas adicionadas após a atualização da mancha, principalmente à norte e à sudoeste, as diferenças de temperatura são positivas durante quase todo o ciclo diário. Assim, a substituição de áreas vegetadas por áreas urbanas, resultou em um aumento de temperatura, com a ocorrência de valores de até 2,6°C, no final da tarde, para o município de Itaúna (-20,11°; -44,61°), à sudoeste do domínio. Tal crescimento pode ter sido ocasionado pela atuação conjunta de diversos fatores, que incluem, a diminuição no albedo da superfície, o aumento do fluxo de calor sensível com a redução de áreas vegetadas, e a diminuição da velocidade do vento em função do aumento da rugosidade da superfície.

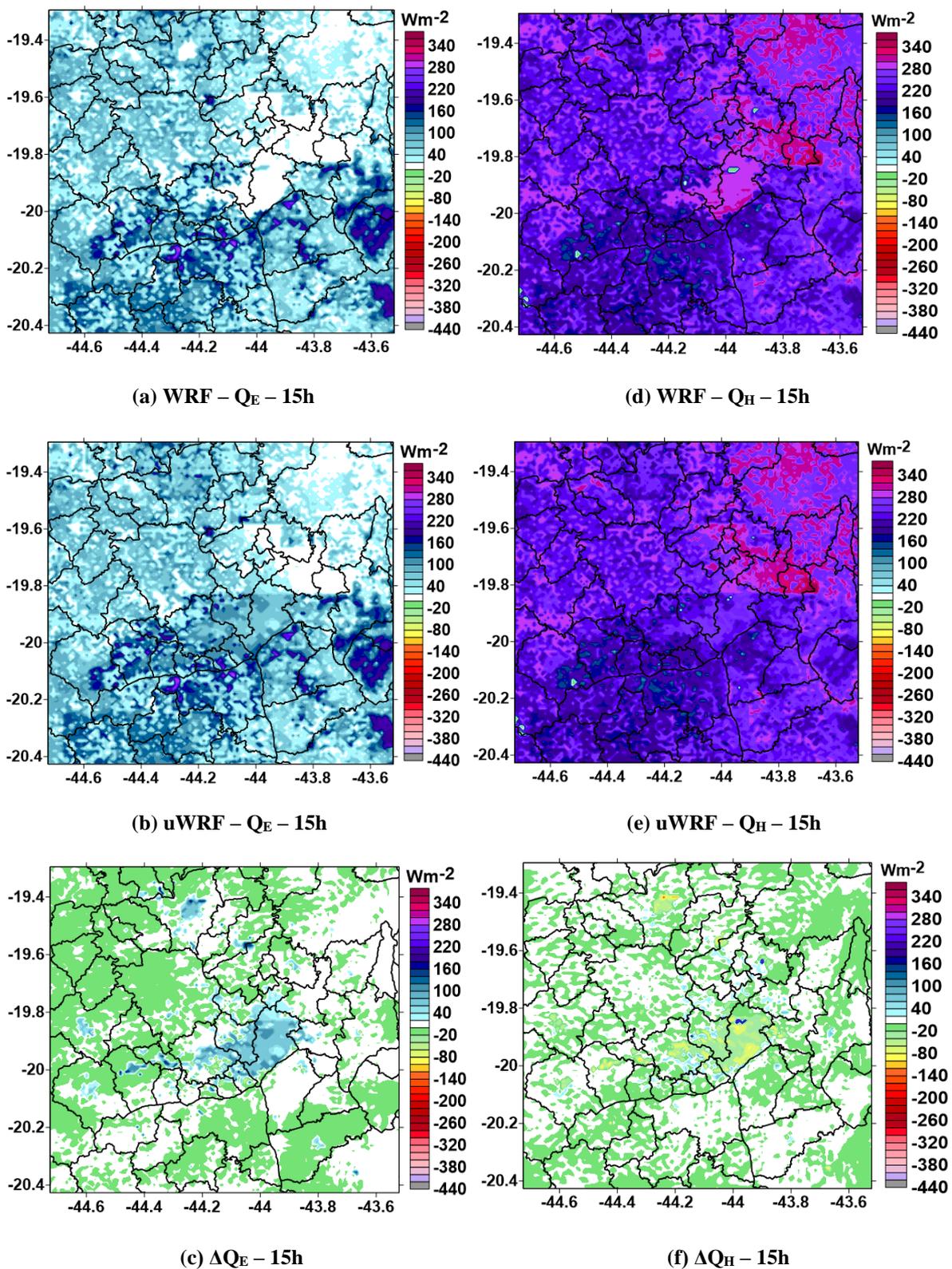
Para o período noturno, tem-se que, na maior parte do tempo, as diferenças são negativas, o que indica que as temperaturas produzidas pela versão padrão (controle) são maiores que as geradas pela versão urbana. A maior diferença negativa verificada entre as simulações foi de 1,1°C, para às 18h.

Observa-se ainda que o BEP, apesar de ser ativado somente para as células urbanas, é capaz de produzir alterações na temperatura em outras regiões do domínio, indicando a atuação do transporte horizontal e levando à constatação de que as mudanças provocadas em uma região, pelo motivo supracitado, podem impactar nas condições meteorológicas de outras áreas. Como a temperatura pode ser influenciada por outros fatores, também foram plotadas os fluxos de calor superficiais, a fim de se verificar o impacto da ativação do módulo do BEP em conjunto com a atualização da extensão da mancha urbana.

Também foram analisados os fluxos superficiais de energia, que impactam significativamente na formação e evolução de nuvens, precipitação e poluição do ar, sendo cruciais para simulação da mistura vertical, camada limite e transporte atmosférico (PLEIM e RAN, 2011). Para análise dos fluxos superficiais foram escolhidos os horários de 15h (média das 15h dos cinco dias simulados), para representação das tendências diurnas e de 21h (média das 21h dos cinco dias simulados), para representação das tendências noturnas, evitando-se os períodos de transição entre dia e noite.

Na Figura 50, encontram-se os resultados para os fluxos de calor latente (Q_E) e sensível (Q_H) modelados pelo WRF e pelo uWRF, bem como as diferenças (Δ) produzidas entre a versão urbana e padrão. Já na Figura 51, encontram os resultados para o calor do solo (Q_G) e o saldo de radiação (Q^*). Ambas as figuras são referentes ao período das 15h e utilizaram a mesma escala de cores, de modo a permitir suas comparações visuais.

Figura 50: Fluxos médios de calor latente (Q_E) e sensível (Q_H) modelados pelos WRF e uWRF para às 15h (horário local).



Inicialmente, é possível observar que para o período diurno o fluxo de calor latente modelado é positivo, ou seja, é dirigido da superfície para a atmosfera, dissipando calor a partir da mudança de estado físico da água líquida para vapor, sem aumento da temperatura do ar. Os valores mais elevados de fluxos de calor latente estão presentes em áreas com corpos d'água e de vegetação mais densa, classificadas como *evergreen broadleaf forest* (floresta de árvores latifoliadas), apresentando valores máximos de até 302 W.m^{-2} em ambas as simulações. As florestas tendem a produzir mais evapotranspiração que a vegetação herbácea uma vez que possuem raízes maiores, alcançando camadas mais profundas do solo, além de uma maior área foliar (XIA *et al.*, 2015).

Para o centro do domínio, onde está localizada a mancha urbana, os fluxos de calor latente simulados pela versão padrão foram nulos, diferentemente do que ocorreu na versão urbana. Tal comportamento pode ser atribuído ao distinto tratamento dado pelo BEP às cidades. Como já mencionado, ao trabalhar com o conceito de fração urbana, o módulo permite a representação da vegetação urbana na célula enquanto na abordagem padrão toda a área é considerada exclusivamente urbana e homogênea.

Desta forma, as maiores diferenças calculadas na Figura 50(c) são referentes às células urbanas em que o fluxo de calor latente anteriormente era igual a zero e que a partir da ativação do BEP, passaram a apresentar vegetação. Foram encontradas diferenças de fluxo de até 219 W.m^{-2} . A classe de vegetação que é considerada na ativação dos modelos de dossel depende do banco de dados de uso e ocupação do solo escolhido pelo usuário. No caso do MODIS, a classe usada para representar a porção não urbana das células urbanas é a de *cropland/natural vegetation mosaic* (mosaico de vegetação natural e terras cultivadas), como indicado no arquivo VEGPARM.TBL do WRF.

No item 5.3.2.1 deste tópico serão abordadas com mais detalhes quais são as informações que o modelo de superfície terrestre Noah LSM considera na estimativa da transpiração. Dentre elas encontram-se os fatores de estresse relativos à chegada de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e umidade do solo. Considerando que as tendências observadas nas cidades são de canalização dos córregos, impermeabilização dos solos, diminuição das áreas verdes e a intensificação do desenvolvimento de atividades antropogênicas que liberam calor e poluentes, com o conseqüente favorecimento da ocorrência de ilhas de calor, frequentemente as plantas nas áreas urbanas podem se encontrar sob estresse hídrico e térmico, ocasionando na redução

da transpiração e na restrição de processos metabólicos (IVANAUSKAS, 2002). Assim, apesar do modelo de superfície terrestre considerar tais condições na estimativa da transpiração, é possível que em condições reais os efeitos supracitados sejam ainda mais expressivos, culminando na superestimativa dos fluxos de calor de latente nas células urbanas.

Observa-se também que o BEP foi capaz de diferenciar o grau de ocupação das LCZ. Na região centro-sul de Belo Horizonte, onde encontram-se as duas regiões de LCZ 1, foi verificado um menor fluxo de calor latente, quando comparado com áreas ocupadas por outras classes, em função do alto grau de adensamento e da limitada presença de vegetação (fração de 0,10). Além das áreas urbanas na simulação padrão, outras regiões apresentaram fluxo de calor latente igual a zero, como pode ser observado à nordeste e à oeste da capital. Tal padrão também foi repetido para as outras horas de simulação durante todo o período de estudo. As possíveis causas para tal comportamento são discutidas no item 5.3.2.1.

Para as áreas em que o calor latente modelado foi igual a zero, foram estimados os maiores fluxos de calor sensível (b), com máximas de, aproximadamente, 370 W.m^{-2} , em ambos os casos. Em um estudo para a cidade de Houston, nos Estados Unidos, Lee *et al.* (2011) verificaram que para uma área urbana de baixa densidade, em que Q_E foi suprimido, o modelo Noah LSM superestimou o calor sensível em um máximo de 200 W.m^{-2} durante o dia, quando comparado aos dados observados.

Após a ativação do BEP, os fluxos para a área urbana apresentaram significativa redução para a mancha contígua da RMBH (c), com diferenças mais atenuadas para a porção norte de Belo Horizonte. Para as novas áreas urbanas adicionadas após a atualização do uso e ocupação do solo, no entanto, foram observados incrementos no fluxo de até 80 W.m^{-2} no município de Ibitaré, ao sul de Belo Horizonte, representando um crescimento de 54% a partir da conversão de *Cropland/Natural Vegetation Mosaic* para LCZ 6 (construções baixas espaçadas), com fração urbana equivalente à 0,7.

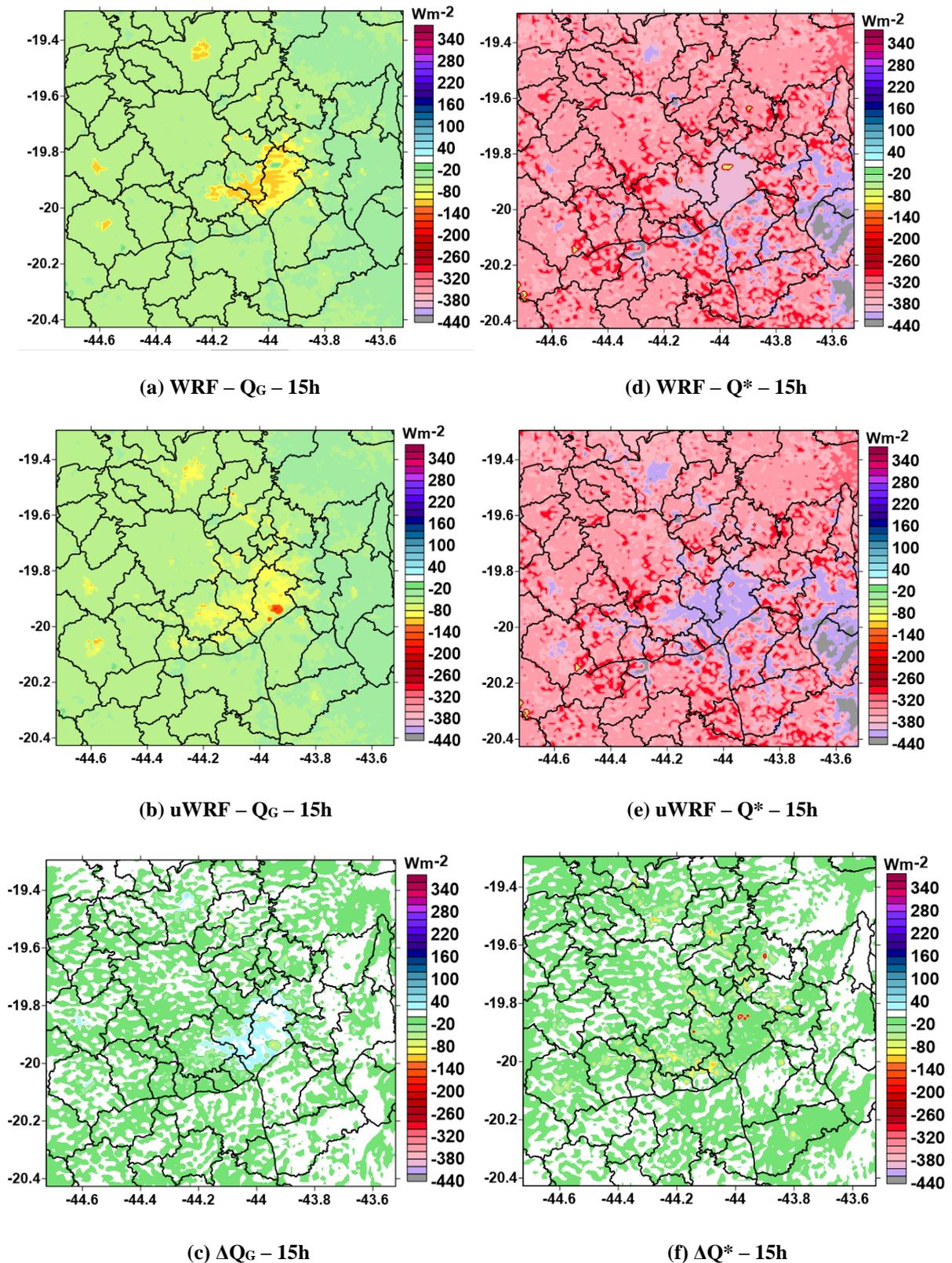
Na Figura 51 são apresentados o fluxo de calor do solo e o saldo de radiação, ambos para o período das 15h. Observa-se que, com exceção de algumas áreas em Belo Horizonte, a versão padrão do WRF, com as zonas urbanas tratadas pelo modelo do Noah LSM, apresentou fluxos mais negativos do que aqueles modelados pelo BEP, indicando um maior armazenamento de energia nas camadas do solo. Tal tendência somente foi diferente para as regiões de LCZ 1 em que os fluxos modelados pelo BEP foram 57% superiores àqueles apresentados pela abordagem

padrão. Tal padrão pode ser resultado do fenômeno de aprisionamento de radiação contabilizado pelo modelo de dossel, favorecido pelas altas razões H/W propostas para a classe em questão.

Com relação às diferenças (c), em função dos sinais negativos neste período do dia, estas são positivas quando os fluxos de calor calculados pelo WRF são superiores aos do uWRF. As diferenças positivas são dadas para a mancha contígua da RMBH, apresentado máxima de 43 W.m^{-2} . Já as diferenças mais negativas são verificadas para as áreas urbanas que foram inseridas após a atualização do uso e ocupação do solo (ao norte de Belo Horizonte) e nas áreas de LCZ 1, como mencionado.

Por fim, foi realizado o saldo de radiação (f), fonte responsável por suprir as demandas energéticas dos processos de evapotranspiração (Q_E), aquecimento do ar (Q_H) e aquecimento do solo (Q_G). Verificou-se que os valores calculados são negativos, indicando que a energia é excedente neste período, como esperado. Devido à diferenciação e modificação das características da área urbana e da ativação do BEP, a energia disponível modelada por esta abordagem mostrou-se superior à fornecida pela padrão (diferenças negativas). Observa-se, porém, pelas diferenças de temperatura apresentadas na Figura 49, que um maior excedente não implica necessariamente em um aumento da temperatura. Neste caso, parte da energia disponível é dissipada em forma de calor latente, a partir da introdução da consideração da vegetação urbana na célula.

Figura 51: Fluxos médios de calor do solo (Q_G) e saldo de energia (Q^*) modelados pelos WRF e uWRF para às 15h (horário local).



Também foram analisados os fluxos superficiais para uma hora representativa do período noturno (21h). Na Figura 52, encontram-se os resultados para os fluxos de calor latente e calor sensível, bem como suas respectivas diferenças. Com relação aos fluxos de calor latente modelados observa-se que tanto na versão padrão quanto urbana, podem ser observados fluxos negativos à leste do domínio, onde se localizam as zonas de vegetação mais densa, indicando a liberação de calor devido a condensação do vapor d'água. Os fluxos máximos apresentados foram de -6 W.m^{-2} .

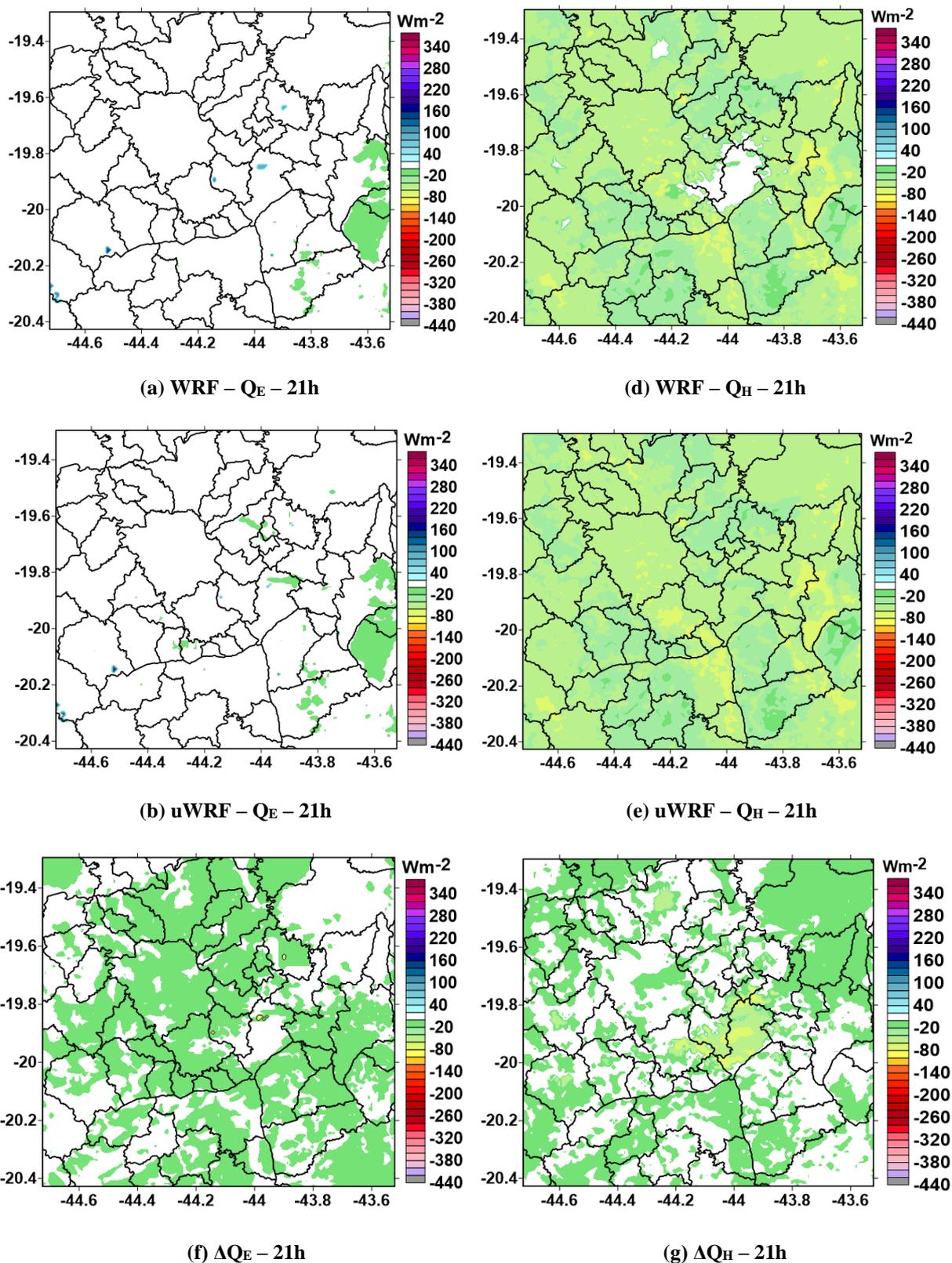
As principais diferenças entre as versões padrão e urbana, são referentes aos corpos d'água. Na primeira, são simulados fluxos positivos de maior magnitude para as Lagoas da Pampulha (Belo Horizonte) e Lagoa Central (Lagoa Santa). Presume-se que tais diferenças são relativas à diminuição do espelho d'água de tais lagoas, que podem estar tanto associados à um processo de assoreamento, como aconteceu com a Lagoa da Pampulha, quanto à erros associados a classificação LCZ possivelmente acentuados pela reamostragem da resolução espacial de 100m da LCZ para a célula de 1 km da grade do WRF, levando à perda de detalhes.

Observa-se ainda que frente às demais parcelas do balanço energético da superfície, os fluxos de calor latente apresentam valores pouco significativos durante a noite, como também acontece nas condições reais. Como dito anteriormente, a formulação do modelo de superfície terrestre considera que a evapotranspiração é proveniente de três fontes principais: da evaporação direta dos corpos d'água e do solo; da evaporação de água interceptada pelo dossel da vegetação; e das próprias folhas das plantas (GODFREY e STENSRUD, 2010).

A contribuição da evaporação direta esperada para a região de estudo é mínima, uma vez que somente são representadas duas lagoas no domínio e o solo encontra-se seco, no período de inverno. A parcela de evaporação referente à interceptação da água de chuva inexistente, dado que o modelo não simulou precipitação. Por fim, a contribuição da transpiração das folhas da vegetação durante o período noturno também pode ser considerado ínfimo.

À noite, os estômatos das plantas, estruturas responsáveis por controlar as trocas de CO_2 e vapor d'água, encontram-se fechados. Como as aberturas em que ocorrem as trocas gasosas de água e gás carbônico são as mesmas, as plantas não podem absorver CO_2 sem que exista a perda de água, assim durante o período noturno em que não há energia solar para a realização da fotossíntese, tais estruturas mantêm-se fechadas, além de ser um mecanismo para minimizar a perda excessiva de água (COLLATZ *et al.*, 1991).

Figura 52: Fluxos médios de calor latente (Q_E) e sensível (Q_H) modelados pelos WRF e uWRF para às 21h (horário local).



Quanto à parcela de calor sensível, é possível observar para o período noturno estas apresentam-se negativas para a maior parte do domínio, para ambas os casos. As exceções são referentes à mancha urbana no centro do domínio e regiões à leste e noroeste, para a simulação padrão. Nestas verifica-se que os fluxos modelados são positivos (máximo de 22 W.m^{-2}), indicando que às 21h a superfície ainda está apta a provocar o aquecimento do ar, em função do calor armazenado durante o período diurno.

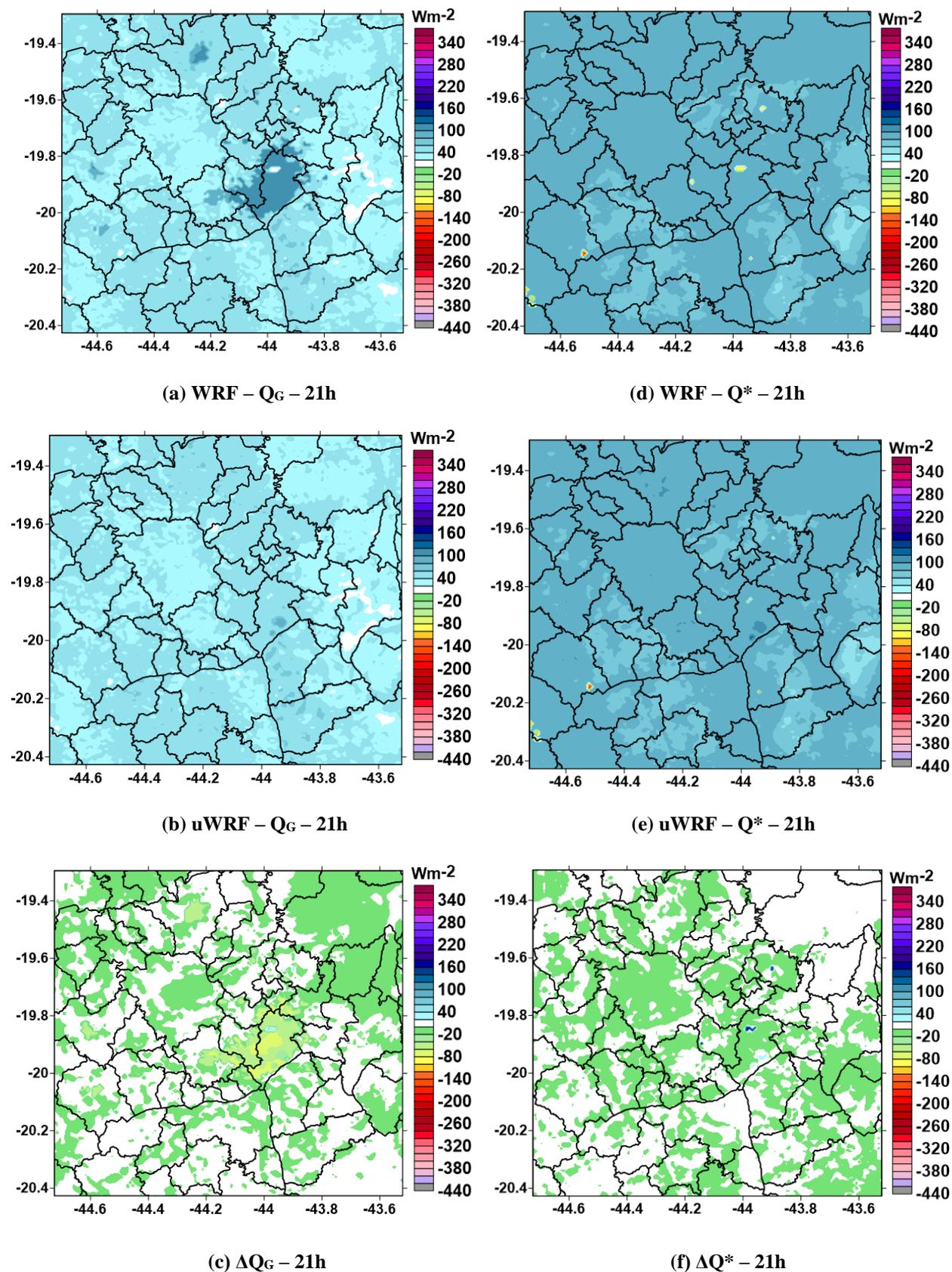
Na Figura 53(a), em que é apresentado o fluxo de calor do solo modelado pelo WRF, observa-se máximos de até 118 W.m^{-2} , que atua como fonte de energia durante o período noturno. Para os fluxos modelados pelo uWRF, verifica-se que os maiores valores estão associados às zonas ocupadas pelas LCZs 1. Nem mesmo para estas áreas as diferenças (c) calculadas foram positivas. Assim, a abordagem padrão ao considerar as áreas urbanas homogêneas, não vegetadas, modificando somente os principais parâmetros de caracterização, leva à modelagem de fluxos superiores e, possivelmente, superestimados.

Finalmente, com relação à radiação líquida, verifica-se que em ambas as simulações os fluxos são positivos, apontando o déficit usual do período noturno. Para a simulação com uWRF, as maiores perdas de energia nas áreas urbanas estão relacionadas às LCZ 1 (121 W.m^{-2}). Para as demais regiões não foram verificadas diferenças relevantes, como pode ser confirmado na Figura 53(f). Para as células classificadas como água, observa-se que os fluxos modelados são negativos mesmo durante a noite.

A partir das constatações observadas, pode-se dizer que uma representação mais complexa dos processos que ocorrem nas cidades não necessariamente implica em um aumento dos fluxos de calor e da temperatura. No entanto, é importante ressaltar que a simulação controle pode superestimar fluxos e temperatura e que quando comparado com a simulação urbana, pode indicar que ativação do módulo e dos fenômenos contabilizados por este contribui para uma atenuação das condições, por exemplo, da temperatura.

Assim, é importante mencionar que se o objetivo é a avaliação da ferramenta, tal comparação é válida, mas se o objetivo é a avaliação do fenômeno, idealmente, os fluxos devem ser comparados com dados observados. Assim, também deve-se ressaltar a importância da alocação de estações meteorológicas nas cidades em áreas de distintos graus e características de ocupação para monitoramento do clima urbano, o que ainda não acontece na RMBH.

Figura 53: Fluxos médios de calor do solo (Q_G) e saldo de energia (Q^*) modelados pelos WRF e uWRF para às 21h (horário local).



5.3.2.1 Avaliação da influência do modelo de superfície terrestre Noah LSM nos fluxos de calor latente

Como constatado anteriormente, algumas células vegetadas das simulações padrão e urbana não apontaram fluxos de calor latente durante o dia, levando o modelo à atribuição de altos fluxos de calor sensível em tais regiões, possivelmente superestimados. Com a finalidade de compreender melhor as limitações do modelo de superfície terrestre Noah LSM, os fatores intervenientes e o impacto nos parâmetros meteorológicos, foram levantados os principais componentes contribuintes para o cálculo do fluxo de calor latente.

O esquema considera que o combustível para a dissipação de energia em forma de calor latente, o processo de evapotranspiração, é dependente de três parcelas: da evaporação da água da chuva interceptada pelo dossel da vegetação, da transpiração das plantas e da evaporação direta do solo. Como o modelo não apontou a ocorrência de chuva no período de estudo (o que está de acordo com os dados observados), supõe-se que somente as duas últimas parcelas sejam relevantes. A transpiração das plantas pode ser calculada a partir da Eq. (19)(XIA *et al.*, 2015):

$$E_t = vE_p B_c \left[1 - \left(\frac{W_c}{S} \right)^{0,5} \right] \quad (19)$$

Em que: E_t é a transpiração da vegetação a partir da absorção de água pelas raízes no solo; v é a fração vegetada verde ou fotossinteticamente ativa; E_p é a evaporação potencial máxima de uma superfície dada nas condições atmosféricas consideradas; B_c é uma função que depende da resistência estomática da planta, ou seja, da oposição ao transporte de gases, como vapor d'água e CO_2 para ou dos estômatos das folhas; W_c é o conteúdo de água interceptado pelo dossel das árvores enquanto S , representa a sua capacidade máxima. Por sua vez a referida resistência estomática da planta (R_c), depende dos fatores expressos na Eq. (20)(XIA *et al.*, 2015):

$$R_c = \frac{R_{c\min}}{LAI F_1 F_2 F_3 \delta F_4} \quad (20)$$

Em que: $R_{c\min}$ é a mínima resistência estomática da planta; LAI é o índice de área foliar, fornecendo uma medida de biomassa da vegetação; δ é um fator sazonal que representa a variação da distribuição das raízes de um dado tipo de vegetação; F_1 , F_2 , F_3 e F_4 são funções de

estresse relativos à chegada de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e umidade do solo, respectivamente.

As características da vegetação expressas por v e o LAI são importantes em função de determinarem a partição dos fluxos superficiais em calor latente (sobre áreas vegetadas) ou sensível (sobre áreas com solos ou vegetação seca). Tais características encontram-se listadas para cada tipo de vegetação definida pela classificação de uso e ocupação do solo, MODIS ou USGS, na tabela de VEGPARAM.TBL do modelo WRF.

Além disso, a transpiração também é dependente das condições do meio. Áreas em que se tem altas temperaturas e solo mais secos apresentam altos fluxos de calor sensível enquanto os fluxos de calor latente são suprimidos (GODFREY e STENRUD, 2010). Assim, se nestas condições a vegetação estiver sob estresse térmico e hídrico, devido à altas temperaturas e baixa umidade do ar e do solo, a resistência estomática se eleva, reduzindo a liberação de água.

Além das características da vegetação, o tipo de solo tem importante papel na tomada de água pela raízes das plantas. A sua propriedade mais relevante é a textura, condicionando os valores de capacidade de campo, ponto de murcha permanente e condutividade hidráulica. Os dois primeiros itens referem-se à capacidade máxima do solo em reter água e ao teor de umidade a partir do qual a planta não é mais capaz de retirar a água do solo, apresentando murchamento irreversível. A diferença entre ambos é a água considerada disponível para absorção das plantas para transpiração. Assim, para as plantas em solo com frações granulométricas mais grossas, como os arenosos, tal parcela é reduzida uma vez que estes são drenados rapidamente. À medida em que as frações vão diminuindo, devido à formação de poros menores, aumenta-se a capacidade de retenção de água, como é o caso dos solos argilosos e siltosos (XIA *et al.*, 2015).

O tamanho das partículas também controla a condutividade hidráulica de um solo, ou a facilidade com a qual a água se movimenta neste. Solos de textura mais fina apresentam condutividades mais baixas que aqueles de textura mais grossa, dificultando o movimento da água. Portanto, a textura do solo determina o armazenamento de água, influenciando indiretamente no potencial de evapotranspiração (XIA *et al.*, 2015). Todos os parâmetros mencionados, além de outros, encontram-se listados para dezenove diferentes tipos de textura do solo na tabela de SOILPARAM.TBL do modelo WRF.

Tendo em vista os principais parâmetros dos quais dependem o fluxo de calor latente, foram reunidas informações que poderiam indicar os motivos de sua supressão na região de estudo. Observou-se que os fluxos nulos estão relacionados ao domínio vegetativo das savanas, fazendo alusão à vegetação endêmica do Cerrado. Neste tipo de vegetação predominam os arbustos isolados e as gramíneas, sendo estas dotadas de sistema radicular raso e de mecanismo de restrição de transpiração durante os meses de inverno (ARENS, 1958). Na Tabela 21 constam os dados relevantes dos tipos de vegetação presentes na RMBH, proveniente do arquivo de VEGPARM.TBL, em que: SHDFAC é a fração de vegetação verde, NROOT é n° de camadas de raízes, RS é a resistência estomática, RGL é um parâmetro usado na função de estresse relativo à radiação, HS é um parâmetro usado na função de estresse relativo ao déficit na umidade do ar e LAIMIN é índice de área foliar mínimo.

Observa-se que a savana apresenta uma das menores frações de vegetação verde e índice de área foliar dentre os tipos de plantas, sendo inferior somente aos usos urbanos e solos nus ou pouco vegetados. Além disso, é considerado que as raízes somente alcançam até a terceira camada de solo apresentando alta sensibilidade à baixa umidade do ar (HS).

Tabela 21: Parâmetros da tabela de VEGPARM.TBL do WRF para as classes de vegetação do MODIS presentes na área de estudo.

Classe de uso e ocupação do solo	SHDFAC	NROOT	RS	RGL	HS	LAIMIN
<i>Evergreen Needleleaf Forest</i>	0,70	4	125	30	47,35	5,00
<i>Evergreen Broadleaf Forest</i>	0,95	4	150	30	41,69	3,08
<i>Deciduous Broadleaf Forest</i>	0,80	4	100	30	54,53	1,85
<i>Mixed Forests</i>	0,80	4	125	30	51,93	2,80
<i>Closed Shrublands</i>	0,70	3	300	100	42,00	0,50
<i>Open Shrublands</i>	0,70	3	170	100	39,18	0,60
<i>Woody Savannas</i>	0,70	3	300	100	42,00	0,50
<i>Savannas</i>	0,50	3	70	65	54,53	0,50
<i>Grasslands</i>	0,80	3	40	100	36,35	0,52
<i>Permanent Wetlands</i>	0,60	2	70	65	55,97	1,75
<i>Croplands</i>	0,80	3	40	100	36,25	1,56
<i>Urban and Built-Up</i>	0,10	1	200	999	999,0	1,00
<i>Cropland/Natural Vegetation Mosaic</i>	0,80	3	90	100	36,25	2,29
<i>Barren or Sparsely Vegetated</i>	0,01	1	999	999	999,0	0,10

Além disso, também foram analisadas as características do solo. Na Figura 54, encontram-se representadas as categorias dominantes na RMBH, segundo o banco de dados do próprio modelo. Na Tabela 22 constam os dados provenientes do arquivo de SOILPARM.TBL relativos a tais classes, em que: REFSMC é capacidade de campo do solo; SATDK é a condutividade hidráulica do solo; WLTSMC é a umidade do ponto de murcha permanente.

Figura 54: Categorias dominantes de textura do solo (top) do domínio D03, em que: 6 – *Loam* (limoso), 7 – *Sandy clay loam* (franco-argilo-arenoso), 9 – *Clay loam* (limo-argilosos) e 12 – *Clay* (argiloso).

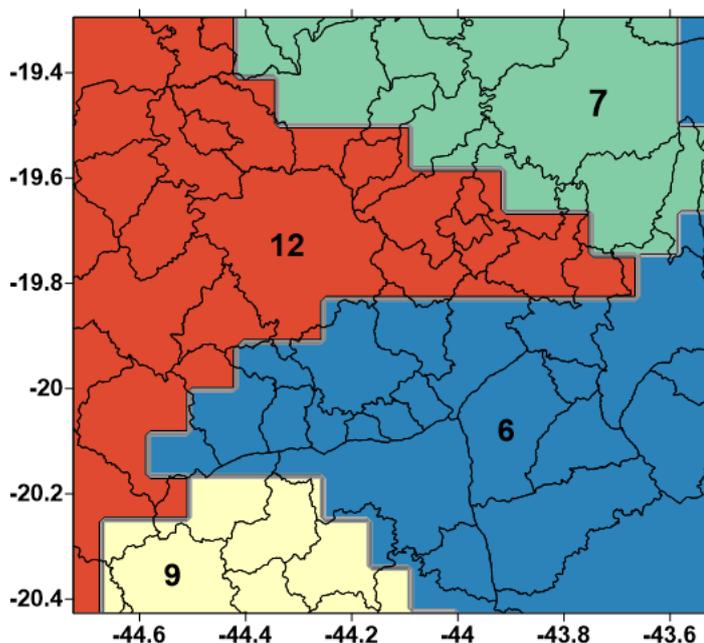


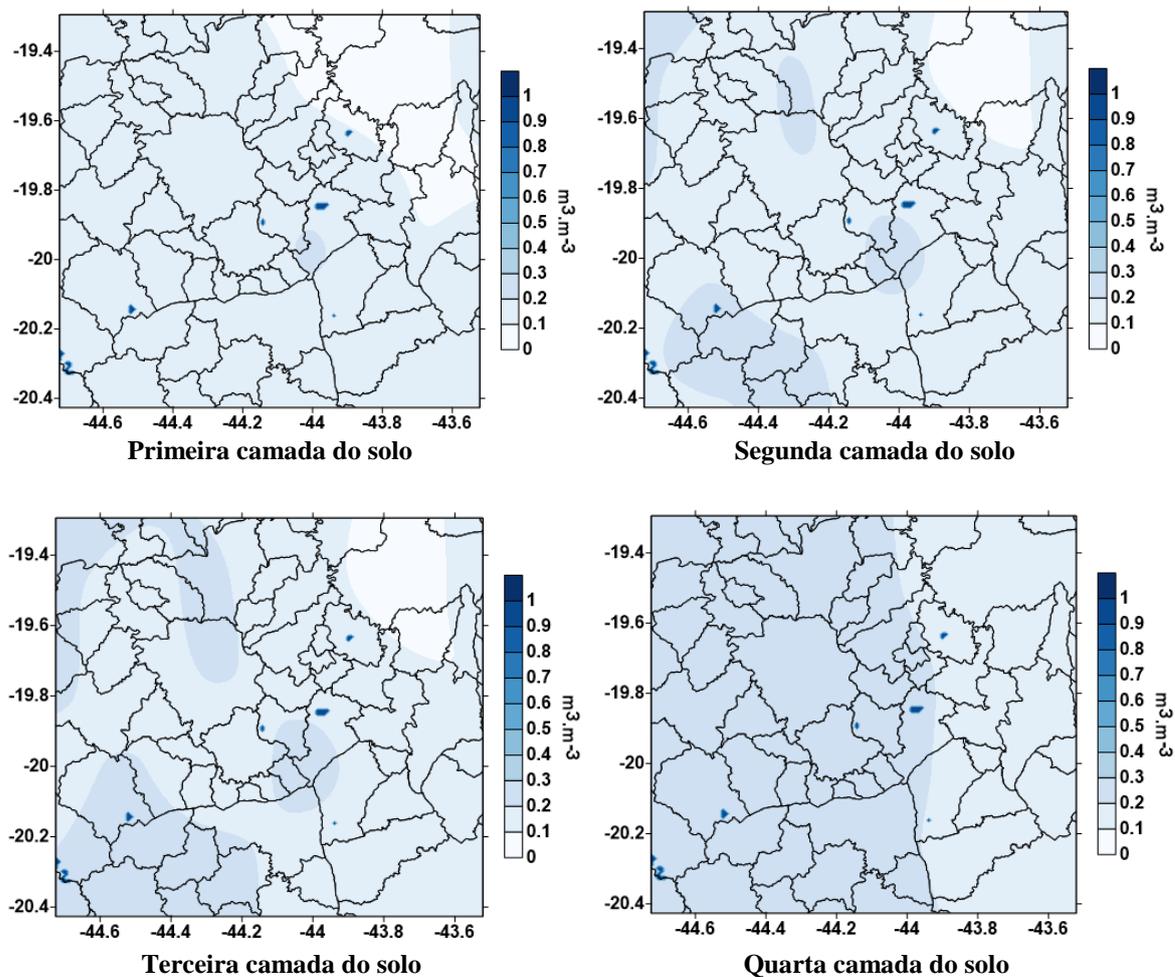
Tabela 22: Parâmetros da tabela de SOILPARM.TBL do WRF para os tipos de solo presentes na área de estudo.

Textura do solo	REFSMC	SATDK	WLTSMC
6 - <i>Loam</i>	0,329	3.38×10^{-6}	0,066
7 - <i>Sandy clay loam</i>	0,315	4.45×10^{-6}	0,069
9 - <i>Clay loam</i>	0,382	2.45×10^{-6}	0,103
12 - <i>Clay</i>	0,412	9.74×10^{-7}	0,138

A partir dos resultados de fluxo de calor latente, foi verificado que os valores nulos encontram-se distribuídos, principalmente, pelos solo do tipo 7 e 12, acompanhando, inclusive, o padrão quadricular na transição de um para o outro ao norte de Belo Horizonte, evidenciando sua relação de dependência. Analisando os parâmetros da tabela, tem-se que os solos argiloso apesar de possuírem elevada capacidade de campo, apresentam baixa condutividade hidráulica, dificultando a movimentação da água por entre os poros e favorecendo o aumento da força de retenção da água. Os solos argilosos apresentam, ainda, os mais altos valores de umidade do ponto de murcha permanente, indicando que a água pode ficar indisponível às plantas mesmo com a sua elevada capacidade em armazená-la. Com relação ao tipo de solo 7, acredita-se que a baixa capacidade de campo e possivelmente, um baixo conteúdo de umidade no solo, confirmado posteriormente pelas condições iniciais, tenha sido o principal fator contribuinte para a supressão da transpiração das plantas.

Na Figura 55 são apresentadas tais condições iniciais de umidade nas quatro camadas do solo, provenientes dos dados de *final analysis* do NCEP. Observa-se que na primeira e na segunda camada do solo, a umidade à nordeste do domínio é próxima de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. O fato das raízes da vegetação da savana não atingirem os níveis mais profundos do solo, aliado às baixas umidades em tal região (comparativamente às outras), também pode ter contribuído para o estresse hídrico das plantas.

Figura 55: Umidade inicial do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) provida pelos dados de *final analysis* do NCEP.



Desta forma, um conjunto de fatores parece ter contribuído para a supressão da transpiração da vegetação à nordeste da região, como o tipo de vegetação, as condições iniciais de umidade do solo, as condições atmosféricas seca do período de inverno e o tipo de solo. Cabe ressaltar também que a falta de dados observacionais para a inicialização dos modelos de superfície terrestre, bem como a resolução daqueles que estão disponíveis e as imprecisões na própria formulação de tais modelos são responsáveis por introduzir erros nas simulações, prejudicando

os resultados, principalmente, dos parâmetros meteorológicos próximos ao solo (GODFREY e STENSRUD, 2010).

5.3.2.2 Balço energético superficial pontual – Diferenciação das classes da LCZ

Além da análise dos fluxos superficiais para todo o domínio, também são apresentados resultados para células específicas, com o objetivo inicial de verificar se o modelo meteorológico acoplado ao módulo urbano é capaz de diferenciar as diferentes LCZs. Além disso, também pretende-se observar a influência das características do uso e ocupação do solo na partição da energia. Na Tabela 23, encontram-se as médias de todo o período de estudo dos fluxos superficiais para o período diurno e noturno para células adjacentes de diferentes classes LCZ.

Tabela 23: Balço energético médio da superfície para as diferentes classes urbanas da LCZ.

Período	Fluxos (W.m ⁻²)	Classificação do uso e ocupação do solo					
		LCZ 1	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9
Dia (07 - 17h)	Q _E	29.5	43.4	65.2	90.9	47.8	160.2
	Q _H	271.6	273.3	303.8	265.0	304.1	231.4
	Q _G	-153.0	-120.9	-99.0	-82.8	-98.7	-46.4
	Q*	-454.2	-437.6	-468.1	-438.7	-450.6	-438.1
Noite (18 - 06h)	Q _E	0.3	0.0	0.1	0.3	-0.1	0.5
	Q _H	-20.6	-25.5	-37.9	-44.0	-31.8	-57.5
	Q _G	91.4	67.5	58.7	48.9	58.6	32.9
	Q*	111.7	93.0	96.5	92.6	90.5	89.8

Analisando-se inicialmente o período diurno, observa-se pela tabela que quanto maior a fração urbana, menor é o fluxo de calor latente produzido, como esperado. Em uma LCZ 1, somente 6,5% da energia líquida é dissipada na conversão de água líquida para vapor, enquanto em uma LCZ 9, tal quantitativo é de 36,6%. Para a primeira, a fração vegetada é somente 10%, enquanto para a segunda é de 60%.

Para as classes mais adensadas e verticalizadas (LCZ 1 e 2), observa-se que existe uma maior tendência ao armazenamento de calor, como pode ser observado pelos valores mais negativos de Q_G. Para a primeira classe, 33,7% do saldo de radiação é utilizado para o aquecimento do solo, enquanto para a segunda classe, o valor apresentado é de 27,6%. Um dos fatores que pode contribuir para um maior armazenamento de calor é a maior abundância de superfícies

construídas, dependentes da fração urbana e da altura dos edifícios, além dos maiores valores de capacidade e condutividade térmica dos telhados, vias e paredes, comparativamente.

Verifica-se porém que a maior parcela da energia líquida é convertida em calor sensível. Os maiores quantitativos são apresentados pelas LCZ 3 e 8, para as quais 64,7% e 67,6% da energia disponível, respectivamente, é utilizada para o aquecimento do ar, durante o período diurno. Tal tendência pode estar relacionada à posição intermediária ocupada por estas classes, que nem apresentam a capacidade de armazenamento de calor das LCZs mais adensadas, nem apresentam fração vegetada suficiente para dissipar mais energia em forma de calor latente, favorecendo, comparativamente, a liberação do calor sensível.

Por fim, observa-se os maiores quantitativos de energia líquida disponível são relativos às LCZ 1 e 3, com valores de -454,2 e -468,1 W.m⁻². Considerando que a radiação global tenha sido a mesma para as duas localidades, tem-se que as características da superfície como o albedo e a geometria urbana, alteram o seu equilíbrio radiativo. Assim, as propriedades de cada LCZ fazem com que esta apresente maior ou menor habilidade em transformar a radiação solar incidente em energia líquida.

Durante o período noturno, a parcela referente à dissipação de calor latente é insignificante, visto que o processo de transpiração está intimamente ligado a fotossíntese e assim à existência de luz solar. Observa-se também que a existência de condensação (valores negativos) e o retorno de energia para a superfície são pouco representativos no balanço.

Com o ocaso solar, o solo passa a transferir calor para a atmosfera, como indicado pelos valores positivos da variável Q_G . Previsivelmente, os maiores quantitativos estão associados àquelas LCZs em que se verificou o maior armazenamento de energia durante o período diurno. Desta forma, é esperado em áreas classificadas como LCZ 1 e LCZ 2 exista um maior aquecimento do ar, favorecendo a ocorrência da ilha noturna de calor.

Durante a noite, observa-se que o ar transfere energia para o solo, indicado pelos valores negativos de calor sensível. A tendência verificada entre as LCZs é de aumento do fluxo à medida em que a fração urbana é reduzida. Desta forma, os maiores quantitativos são referentes às classes 6 e 9. Tal fato pode estar relacionado, principalmente, ao rápido resfriamento do solo em tais classes, o que favoreceria a transferência de calor do ar para a superfície como forma de compensação.

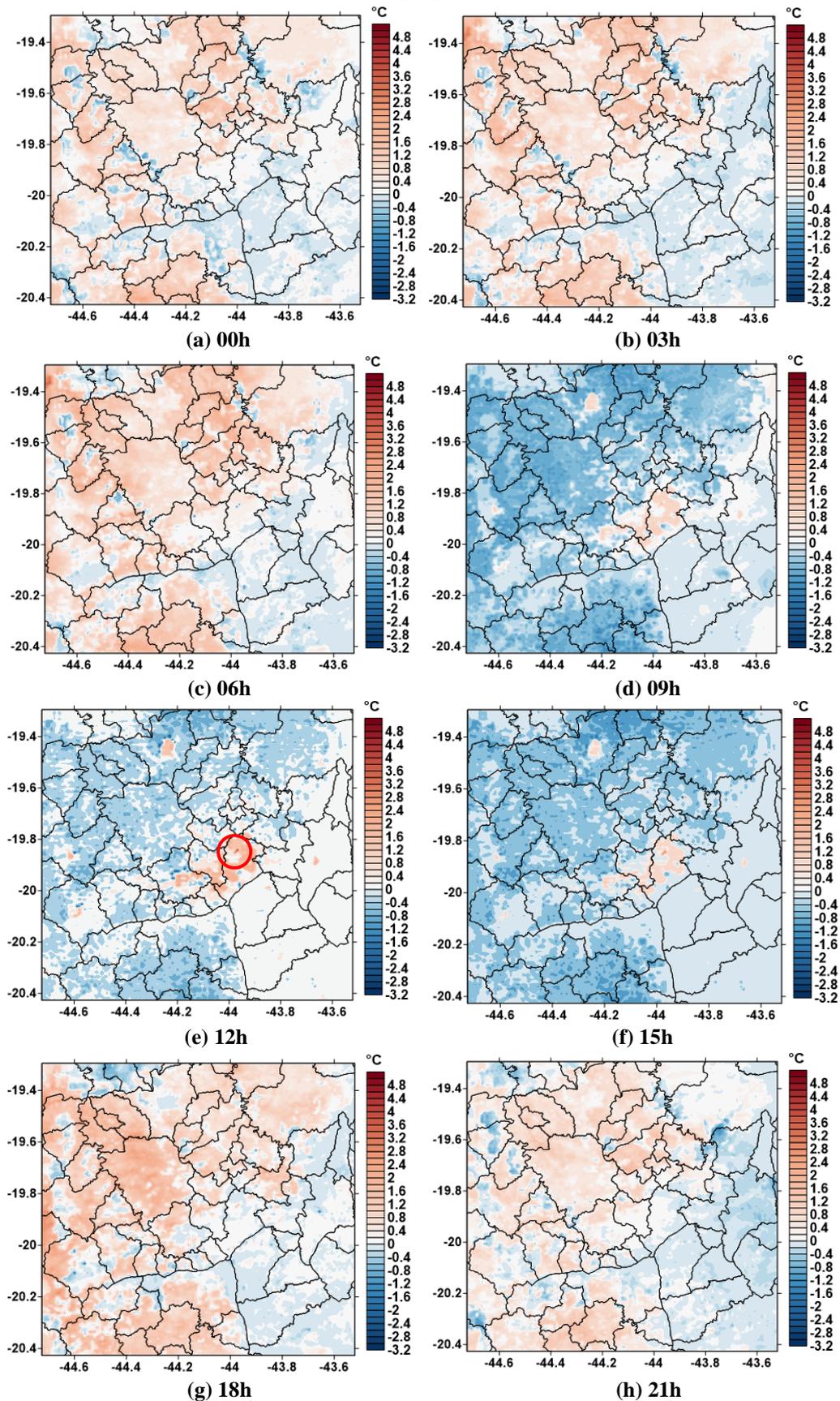
Em resumo, observa-se que o uWRF é capaz de reconhecer os parâmetros de dossel urbano inseridos na tabela de inicialização do BEP, na qual cada LCZ é caracterizada, e acoplá-los ao modelo de superfície terrestre Noah LSM, para o cálculo ponderado dos fluxos de energia, produzindo quantitativos condizentes com as características determinadas. Assim, na partição dos fluxos foi verificado que parcela relativa ao calor latente é mais representativo nas classes que possuem maior fração vegetada, o armazenamento de calor é mais favorecido nas classes mais compactas, bem como a habilidade em transformar energia incidente em energia disponível.

5.4 Avaliação da mudança nas condições meteorológicas locais da RMBH a partir de cenário de expansão da mancha urbana

5.4.1 Análise da diferença da temperatura do ar próximo à superfície

A partir da aplicação do cenário futuro de expansão da mancha urbana, foram calculadas as diferenças produzidas na temperatura do ar a 2m, utilizando-se a simulação gerada pelo uWRF com o atual uso e ocupação do solo como controle. Os resultados são apresentados na Figura 56, como médias horárias. Inicialmente, observa-se que as menores diferenças concentram-se no setor leste-sudeste, para o qual não foram aplicados os critérios de conversão. Para as demais regiões, verifica-se que as diferenças variam com a evolução do ciclo diário. É importante ressaltar que a temperatura próxima à superfície depende não somente das características das superfície imediatamente adjacente mas também das condições da alta atmosfera e do transporte horizontal.

Figura 56: Diferença de temperatura horária média a 2m (°C) para os horários de 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h e 21h, entre as simulações do uWRF com o uso e ocupação do solo do cenário hipotético e o corrente.



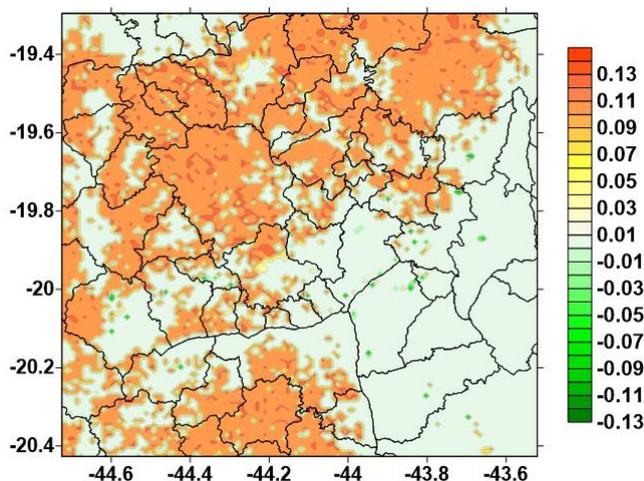
Durante o período diurno (09h – 15h), as diferenças apresentadas para a parte mais adensada e verticalizada do domínio (ao centro) são, em sua grande parte, positivas. Assim, as modificações propostas mostraram-se suficientes para elevar a temperatura do ar nas áreas urbanas em até 2,3°C, ao meio-dia. As maiores diferenças porém, estão associadas às células anteriormente classificadas como água, destacada na Figura 56(e), apresentando máximos de até 4,9°C.

Em tal região encontra-se a Lagoa da Pampulha. Com a aplicação do cenário, as células relativas ao corpo d'água citado foram convertidas para aqueles usos das células adjacentes, como pode ser visto na Figura 30. Tal comportamento pode ser associado ao método de interpolação (*nearest neighbour* - vizinho mais próximo) usado na reamostragem da classificação LCZ para a grade de 1 km do modelo. Como resultado, os parâmetros relativos às propriedades da superfície foram alterados significativamente, ocasionando em diferenças de temperatura pouco realistas.

Para as regiões convertidas em LCZ de baixa densidade populacional (classes 6 e 9), as tendências diurnas são de resfriamento, com diferenças de até 3,0 °C. O incremento da temperatura associado ao processo de urbanização é gerado por um conjunto de fatores. Um deles é a mudança no equilíbrio radiativo da superfície, a partir da substituição de sua cobertura. O albedo é uma das propriedades responsáveis por alterar a parcela da radiação solar que é refletida de volta à atmosfera.

Na Figura 57, encontra-se a diferença do albedo calculada entre o uso e ocupação do solo corrente e futuro. As diferenças positivas (em tons de laranja) indicam que o albedo deste último foi reduzido, o que implica em uma menor fração da radiação solar sendo refletida (HAMDI *et al.*, 2008). Tal tendência é verificada, principalmente, para as regiões recém-urbanizadas, em que a vegetação foi substituída por LCZs de baixa densidade, auxiliando na justificativa do comportamento observado em tais áreas ao decorrer do dia.

Figura 57: Diferença entre os albedos superficiais dos cenários com uso e ocupação do solo corrente e o futuro.



Aliada à menor reflexão da luz solar, a substituição por materiais de construção, que apresentam reduzido conteúdo de água, e maior capacidade e condutividade térmica, acabam por favorecer o armazenamento de energia (MAITELLI, 2010). Assim, se uma significativa fração da energia disponível é armazenada, menor é o fluxo de calor sensível para aquecimento do ar, o que justifica as diferenças negativas encontradas durante o dia (KAPLAN *et al.*, 2017).

Para o período noturno (18h – 06h), as tendências apresentadas para as áreas recém-urbanizadas foi de aumento de temperatura para todas as horas consideradas, com diferenças máximas positivas de até 3,2°C, durante a madrugada (03h), corroborando a hipótese de armazenamento de calor citada acima. Para as áreas inicialmente já mais adensadas (ao centro do domínio), a aplicação do cenário provocou efeitos distintos. Nas primeiras horas da noite (18h – 21h) as tendências verificadas, no geral, são de diferenças nulas ou suaves, da ordem de -0,2°C. Para as demais horas, observa-se uma tendência de aquecimento na região norte e central de Belo Horizonte, com temperaturas máximas de até 0,8°C, possivelmente favorecida pelo transporte horizontal de calor.

Para as áreas já urbanizadas outro mecanismo parece ter contribuído para o aumento verificado na temperatura durante o dia, uma vez que as diferenças no albedo foram pouco significativas. A hipótese é que a geometria urbana seja a principal responsável. Como já discutido, altas razões H/W favorecem o aprisionamento de radiação, tanto de onda curta quanto de onda longa, o que pode ter favorecido o aumento de temperatura. Além da modificação do equilíbrio radiativo, o adensamento e verticalização das cidades também contribui para a diminuição da velocidade do vento, prejudicando o transporte advectivo de calor.

Em resumo, é possível observar que o cenário de urbanização proposto resulta na intensificação do aquecimento diurno do ar nas áreas que já eram adensadas e em seu resfriamento nas áreas que anteriormente eram vegetadas. Durante a noite, as primeiras apresentam diferenças mais brandas que oscilam dependendo do horário e as segundas, um aumento de temperatura.

5.4.2 Análise de corte transversal em região de expressiva ocupação

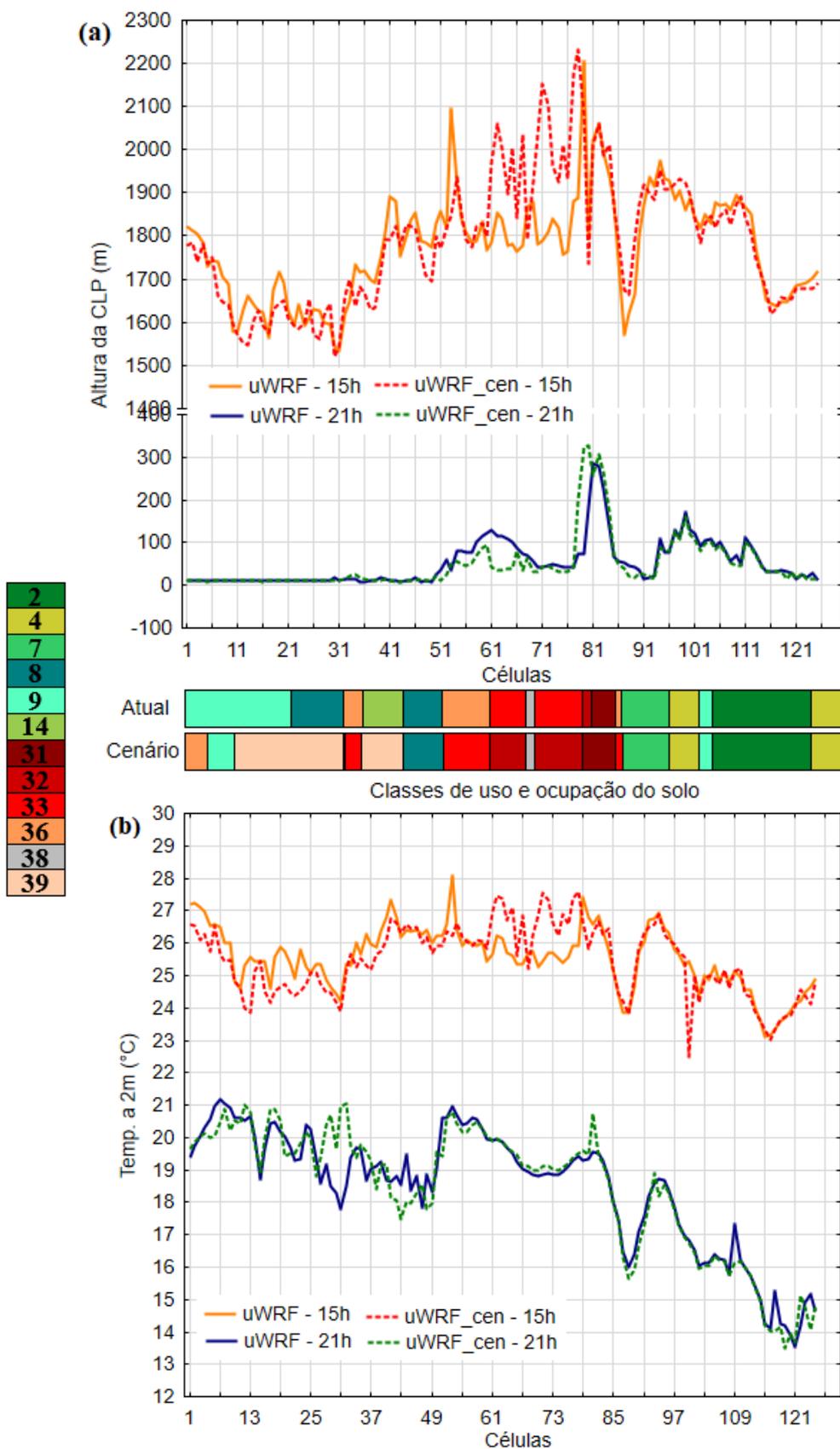
Para uma análise mais detalhada do cenário de urbanização proposto foi analisado um corte transversal sobre a RMBH para observação da temperatura a 2m e da altura da camada limite planetária, relacionando-as com as classes de uso e ocupação do solo, antes e depois da aplicação do cenário de urbanização. O objetivo de observar a CLP é verificar se tal cenário é capaz de alterar as alturas modeladas e, de forma indireta, inferir sobre as condições de mistura.

Calculada pelo esquema físico de CLP, a extensão da referida camada, no caso da parametrização adotada (BouLac), é determinada como aquela em que a energia cinética turbulenta assume um valor suficientemente pequeno ($0,005 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) (BANKS *et al.*, 2015). A altura da CLP, geralmente possui dimensões abaixo dos 100 m durante a noite (estável/neutra) e acima dos 1000 m durante o dia (instável) (GARRATT, 1994).

Na CLP está contida a camada de mistura, cuja denominação é relativa a forte mistura causada pela existência de grande turbulência oriunda de intensa convecção (NUNES, 2008). A altura da camada de mistura é aquela em que as propriedades atmosféricas ou as substâncias originárias da superfície são dispersas por processos turbulentos de mistura vertical (TANG *et al.*, 2016). Embora a altura de tal camada seja usualmente mais rasa que a CLP, esta última é usada na estimativa de sua altura. Assim, indiretamente, é possível mensurar em que extensão vertical ocorre a transferência vertical do calor, a umidade, o momentum e os poluentes gerados na superfície e a atmosfera e as potenciais implicações na qualidade do ar e, conseqüentemente, na saúde pública (KAPLAN *et al.*, 2017).

Os perfis das variáveis citadas encontram-se na Figura 58, na qual também pode ser observada sua relação com as classes urbanas e naturais, antes e depois da aplicação do cenário de urbanização. Foram escolhidas os horários de 15h e 21h, como representantes dos períodos diurno e noturno, para o primeiro dia de simulação (05/09/17).

Figura 58: Corte transversal AB no domínio D03 e os resultados para altura da camada limite (a) e temperatura a 2m (b), para o dia 05 de set-17, considerando os cenários atual e futuro de urbanização.



Observa-se no gráfico (a), para às 15h, à oeste do corte que a conversão de áreas de savana (classe 8 – arborizada, classe 9 – pastagem) e mosaico de lavouras/vegetação natural (classe 14) em áreas de construções baixas e de disposição esparsa (LCZ 9) ou abertas (LCZ 6) contribuiu para a retração da CLP, possivelmente relacionada com as menores temperaturas simuladas pelo uWRF após a aplicação do cenário, como pode ser observado na Figura 58 (b), discutida em detalhes posteriormente.

Verifica-se, no entanto, que as reduções foram pouco significativas. Em média, a altura apresentada para as células anteriores à conversão em LCZ 6 era de 1806 m, e em LCZ 9, de 1651 m. Após as conversões foram verificadas diminuições de 36 m e 21 m. Com relação as temperaturas, anteriormente à conversão das células em LCZ 6 e LCZ 9, as temperaturas médias a 2 metros de altura eram de 27,1°C e 25,5°C. Após a conversão, ambas as reduções verificadas apresentaram valor de 0,7°C. Desta forma, é possível que a queda da temperatura tenha resultado na produção de turbulência convectiva (ou térmica), ocasionado na estimativa do valor mínimo de ECT em níveis mais baixos da atmosfera.

As maiores diferenças positivas produzidas na profundidade da CLP estão associadas às células em que houve a substituição de classes urbanas baixas e compactas (classe 33 - LCZ 3) por classes urbanas mais verticalizadas (classe 32 - LCZ 2), no centro do corte (células 61 a 78). Em média, a altura apresentada anteriormente era de 1814 m, e depois da aplicação do cenário passou para 2004m (incremento de 10,5%). Possivelmente, o aumento da temperatura verificada contribuiu para a flutuabilidade da parcela de ar e a consequente expansão da camada. Para as células citadas, foi constatado aumento médio na temperatura do ar de 25,7°C para 26,8°C (incremento de 4,5%). A maior altura verificada foi relativa ao cenário simulado em uma região de transição entre células classificadas como LCZ 2 e LCZ 1, com valor de 2230 m. Na porção à leste, onde foram mantidas as classes naturais do MODIS, não foram verificadas diferenças significativas entre o uso corrente do solo e o cenário futuro.

Para o período da noite observa-se, inicialmente, que as alturas da CLP estimadas são muito inferiores às encontradas durante o dia, devido às condições de maior estabilidade atmosférica. Sobre as células com vegetação rasteira e de porte arbustivo (à oeste), os valores encontrados variaram entre 10 m e 18 m, mantendo-se nesta faixa mesmo após a conversão das células para classes urbanas de baixa densidade (LCZ 6 e 9).

Já para o centro do domínio e a porção à leste, nas quais se localizam as zonas urbanas mais adensadas e as regiões de mais elevada altitude, observam-se camadas mais profundas. Durante a noite, predominam a produção de turbulência mecânica, proveniente principalmente da intercepção do vento por elementos verticais, como as paredes de edifícios e as árvores. Assim, após a conversão das LCZ 3 no centro do domínio para classes mais verticalizadas (LCZ 2), era esperado que houvesse maior produção de energia cinética turbulenta e conseqüentemente, uma maior expansão da CLP. Porém, é possível que a interação do vento com as áreas urbanas possam ter provocado uma diminuição em sua velocidade, com a conseqüente retração da altura da camada limite. Sobre as células classificadas como LCZ 1, as alturas médias encontradas são de 230 m e 275 m, para a simulação urbana padrão e o cenário, respectivamente.

Como já citado anteriormente, a altura da camada limite é uma importante medida na estimativa da dispersão dos poluentes nas cidades. Para este caso, observa-se que o cenário de urbanização proposto pode auxiliar na expansão da CLP durante o dia com um conseqüente favorecimento na mistura vertical dos poluentes, devido ao um aumento da temperatura. Já durante o período noturno, os efeitos não são muito claros. Os fatores dos quais dependerão as condições de mistura serão as temperaturas noturnas verificadas e o efeito retardante da rugosidade da superfície no vento. Os primeiros contribuindo para a expansão da CLP, e os segundo para a sua retração. Desta forma, outras variáveis, como a ECT e a velocidade do vento, devem ser analisadas para permitir uma melhor percepção das tendências.

Um dos mais importantes impactos da urbanização, porém, é relativo ao aumento da temperatura do ar, uma vez que seus efeitos podem ser sentidos diretamente pela população. Na Figura 58 (b) é possível observar o efeito do cenário de urbanização na temperatura próxima a superfície para os períodos de 15h e 21h. Durante o dia, verifica-se que a expansão da ocupação favoreceu o aumento da temperatura somente já na mancha contínua da RMBH, convertidas de LCZ 3 para LCZ 2. Anteriormente, em média, a temperatura apresentava-se em 25,7°C e após a aplicação do cenário elevou-se em 1°C, como já mencionado. Contudo, foi observada diferença de até 2,1°C, após a verticalização de uma célula pertencente à região sudoeste de Belo Horizonte, limite com o município de Contagem.

Durante a noite, as tendências variaram. Para a porção à oeste (células 25 a 37), a substituição aplicada parece ter contribuído para o aumento da temperatura, que apresentou diferenças de até 2,6 °C. Já para as células imediatamente à direita, foram verificadas quedas na temperatura

de até 0,5°C. Para as regiões já densamente ocupadas, ao centro do domínio, a temperatura noturna pouco variou, com exceção do aparecimento de um pico de 20,7°C, indicando que para esta área os maiores efeitos na temperatura são ocasionados durante o dia.

Observa-se ainda, para ambas as simulações, a grande amplitude térmica verificada ao longo do corte, principalmente durante a noite. Como as principais diferenças são relativas à células urbanas e células vegetadas, tal configuração pode ser associada à formação de ilhas de calor. Para mensurar a sua intensidade é comum a adoção da expressão ΔT_{u-r} , em que ΔT representa a diferença máxima de temperatura entre as áreas urbanas (u) e rurais vegetadas (r) (ASSIS, 2010).

Na Tabela 24, encontram-se as intensidades máximas (diferença entre maior temperatura encontrada para alguma célula urbana e a menor temperatura encontrada para alguma célula vegetada) da ilha de calor encontradas em cada simulação, uWRF e uWRF_cen, para cada horário (15h e 21h). O trecho escolhido para análise é referente à parte leste do domínio, da célula 61 (c.61) à células 126 (c.126), em que existem áreas mais propensas ao desenvolvimento de maiores diferenças de temperatura, em função do contraste das áreas urbanas com altos índices de verticalização próximas às áreas mais vegetadas e de maior altitude (associadas aos elementos topográficos listados na Figura 48).

No período diurno, para a simulação com o uso e ocupação do solo corrente (uWRF), verificou-se que as maiores diferenças de temperatura são referentes à uma célula urbana (c. 79) classificada como LCZ 2 e uma célula vegetada (c. 115) de classe 2 (floresta latifoliada), em a intensidade da ICU apresentada foi de 4,30 °C. Para o cenário de urbanização (uWRF_cen), as maiores diferenças também ocorreram entre células urbanas de LCZ 2 (c.78) e células vegetadas de classe 2 (c.116). A intensidade da ICU apresentada foi de 4,59°C, superior à do cenário atual em 0,29°C, indicando que, possivelmente, a expansão da mancha urbana da RMBH resultará em um intensificação do fenômeno durante o dia.

No período noturno, foi observado que as principais diferenças do caso uWRF também são referentes à células LCZ 2 (c.62) e de floresta latifoliada (c.121), para as quais a intensidade da ICU foi de 6,40°C. Para o cenário de urbanização, as diferenças máximas se deram entre um célula LCZ 1 (c.81) e uma célula também classificada como floresta latifoliada (c. 119). A intensidade da ICU verificada foi de 7,24°C, também superior à apresentada pelo caso controle, com diferença de 0,84°C. Desta forma, observa-se para o corte escolhido que a intensidade da

ilha de calor é ainda mais pronunciada durante o período noturno, e que futuros cenários de urbanização, possivelmente contribuirão para o seu aumento.

Tabela 24: Intensidade máxima da ilha de calor para o trecho c.61 – c.126, para os horários de 15h e 21h, modelados pela simulação urbana com o uso e ocupação do solo corrente (uWRF) e futuro (uWRF_cen).

Caso	Período do dia	Área urbana T_u	Área rural T_r	ΔT_{u-r} (°C)
uWRF	15 h	27,43	23,13	$\Delta T_{c.79-c.115} = 4,30$
	21 h	19,95	13,55	$\Delta T_{c.62-c.121} = 6,40$
uWRF_cen	15 h	27,60	23,01	$\Delta T_{c.78-c.116} = 4,59$
	21 h	20,74	13,50	$\Delta T_{c.81-c.119} = 7,24$

É importante, porém, fazer duas ressalvas quanto à análise anterior. A primeira delas é que as diferenças de temperatura não são ocasionadas somente pelos efeitos do uso e ocupação do solo, mas também pelas diferenças altimétricas entre as localidades. Desta forma, é preciso levar em consideração em que medida cada fator influencia nas diferenças calculadas. A outra ressalva é relativa à distância entre as células analisadas, que terminam por englobar outros interferentes, como diferentes condições de circulação, indicando, portanto, que preferencialmente tal tipo de análise seja mantida em escala mais local.

Por este motivo, uma outra análise concernente à mensuração das ilhas de calor foi realizada. Desta vez, foram escolhidas células mais próximas umas das outras e analisada a influência da altimetria nas diferenças de temperatura encontradas. O critério para seleção das células foi a apresentação de diferenças relevantes para análise, observadas na Figura 58(b) em conjunto com a relevância de sua localização na mancha urbana da RMBH. Assim, foi selecionada a célula de nº 84 (c.84), classificada como uma LCZ 1 e pertencente à região centro-sul de Belo Horizonte, e célula 88 (c.88), classificadas como vegetação arbustiva esparsa (classe 7) e pertencente à formação da Serra do Curral. A distância entre as células é de quatro quilômetros. Por se tratar de uma LCZ 1, o uso e ocupação do solo após a aplicação do cenário foi mantido. As diferenças aqui relatadas são, então, função da modificação da ocupação de células adjacentes.

A intensidade da ICU apresentada entre as células selecionadas para ambos os cenários e horários são apresentadas na Tabela 25. Os valores apresentados são relativos à simples diferença de temperatura do ar a 2m apresentada em cada célula (sem correção) e à diferença de temperatura corrigida pela altitude (com correção). Tal procedimento foi realizado calculando-se a diferença entre a cota altimétrica da célula urbana (c.84) e da célula rural (c.88.)

e aplicando-se o gradiente térmico vertical não saturado de 0,98°C/100m (STULL, 2011). Para a diferença de altitude de 153,3 m apresentada (c.84 – 930,4 m; c.88 – 1083,70 m) foi, então, calculada uma diferença de temperatura teórica de 1,5°C. A realização de tal correção teve como objetivo eliminar a influência da altitude do cálculo da intensidade da ICU.

É possível observar na Tabela 25, para o período diurno, que as diferenças no uso e ocupação do solo na região centro-sul da capital são capazes de elevar a temperatura em quase 0,50°C, no cenário atual, e 1,15°C, no cenário futuro, dentro de uma distância de 4 km. Já para o período noturno as intensidades das ilhas de calor foram ainda mais pronunciadas, com a apresentação de valores de 1,26°C e 1,56°C, para o cenário corrente e o futuro, respectivamente.

Tabela 25: Intensidade da ilha de calor apresentada em um trecho da região centro-sul de Belo Horizonte com e sem correção altimétrica, para os horários de 15h e 21h, modelados pela simulação urbana com o uso e ocupação do solo corrente (uWRF) e futuro (uWRF_cen).

Caso	Período do dia	Área urbana T _u	Área rural T _r	ΔT_{u-r} (°C) s/correção	ΔT_{u-r} (°C) c/correção
uWRF	15 h	25,81	23,86	$\Delta T_{c.84-c.88} = 1,95$	$\Delta T_{c.84-c.88} = 0,45$
	21 h	18,75	15,99	$\Delta T_{c.84-c.88} = 2,76$	$\Delta T_{c.84-c.88} = 1,26$
uWRF_cen	15 h	26,46	23,81	$\Delta T_{c.84-c.88} = 2,65$	$\Delta T_{c.84-c.88} = 1,15$
	21 h	18,69	15,63	$\Delta T_{c.84-c.88} = 3,06$	$\Delta T_{c.84-c.88} = 1,56$

A partir da análise do corte transversal proposto foi possível, então, a verificação do impacto do uso e ocupação do solo na altura da camada limite planetária e na temperatura do ar a 2m, bem como a identificação de ilhas de calor. Recomenda-se aos estudos futuros que outros horários também sejam avaliados, de modo a conhecer a evolução tanto da CLP quanto da temperatura e das ilhas de calor.

5.5 Teste de sensibilidade do BEP

5.5.1 Aumento da razão H/W

Após a aplicação do teste de sensibilidade de redução da largura das vias em 20% e o consequente aumento da razão H/W, foram analisados os efeitos provocados na temperatura do ar a 2m horária média, temperatura da superfície do solo horária média (T_{sk}) e velocidade do vento a 10m para uma área de LCZ 1, classe para a qual os efeitos da substituição deverão ser mais acentuados, localizada próximo à Praça Sete de Setembro, no centro de Belo Horizonte. As variáveis mencionadas foram selecionadas para avaliação em função de se constituir como importante elemento na sensação de conforto térmico no nível do pedestre, no primeiro caso; de auxiliar na compreensão do efeito provocado pelo incremento da razão H/W, no segundo

caso; e na modificação das condições de ventilação, no terceiro caso. Os resultados encontram-se expressos na Figura 59 e Figura 60.

Figura 59: Temperatura a 2m horária média (°C) e superficial (*skin*) horária média (°C) para as razões H/W adotadas inicialmente (Ctrl.) e após a redução das larguras das vias (Mod.), para uma área de LCZ 1, respectivamente.

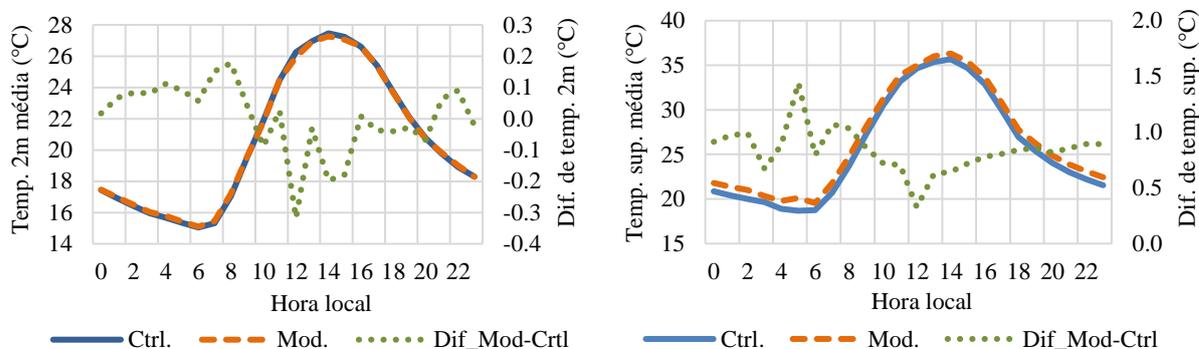
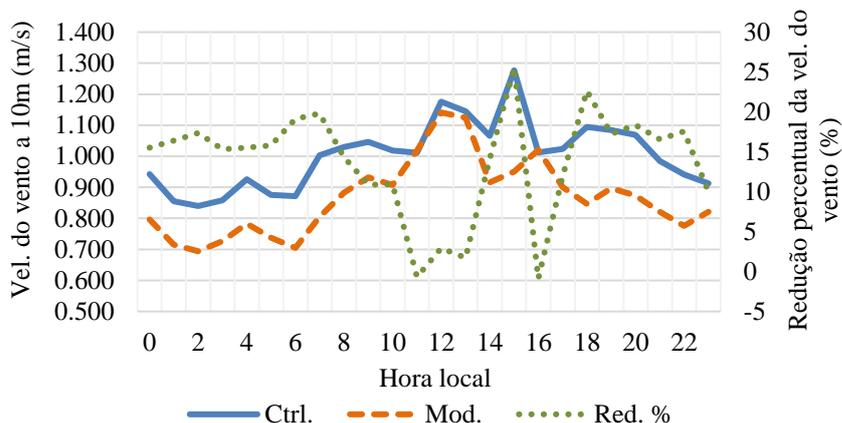


Figura 60: Velocidade do vento a 10m média (m/s) para as razões H/W adotadas inicialmente (Ctrl.) e após a redução das larguras das vias (Mod.), para uma área de LCZ 1.



Como já apontado, a razão H/W influencia no acesso da radiação solar e na dissipação de calor. Durante o período diurno, o sombreamento provocado por edifícios altos pode reduzir a radiação solar que alcança a rua e, conseqüentemente, resultar na diminuição da temperatura do ar próximo à superfície. Em contrapartida, devido à proximidade das construções, a radiação de onda longa e onda curta é aprisionada, sendo sucessivamente absorvida pelas fachadas dos prédios até escapar, ocasionando no aquecimento das superfícies urbanas. Observa-se, então, que durante o dia, os efeitos da geometria do cânion urbano são concorrentes. Durante o período noturno o efeito também se mantém. O calor armazenado durante o dia, que é liberado na forma de radiação de ondas longas, em função dos baixos fatores de visão de céu também tem sua passagem obstruída, reduzindo a irradiação térmica deste. Além disso, o aumento da razão pode influenciar no transporte advectivo de calor a partir da diminuição da velocidade do vento, ocasionada pela interação com os edifícios, o que impacta nas condições de ventilação do

cânion urbano e na dissipação de calor (NUNEZ e OKE, 1977). É importante ressaltar que o transporte advectivo pode contribuir tanto para a adição de calor quanto para a sua retirada.

No caso estudado, observa-se que o incremento foi capaz de provocar somente pequenas diferenças na temperatura do ar a 2m. Durante o período da noite, madrugada e primeiras horas da manhã (até 8h), as tendências apresentadas foram de aumento da temperatura em relação à simulação controle, com valores máximos de 0,17°C. Das 09h da manhã até às 20h da noite, as diferenças tornam-se, em grande parte do tempo, negativas, apresentando uma variação máxima negativa de 0,32°C durante o meio-dia.

Como a temperatura do ar é influenciada por outros fatores, como será discutido mais a frente, também foram verificados os valores da temperatura da superfície do solo, derivada da radiação de onda longa ascendente (nas áreas urbanas) e calculada a partir da lei de Stefan-Boltzmann, como descrito pela Eq. (21) abaixo (ZHAO, 2013; NICHOL, 2009). Com observação de tal variável é possível inferir sobre o efeito do aumento da razão H/W no saldo radiativo.

$$L = \varepsilon\sigma T^4 \quad (21)$$

Em que L é a intensidade de radiação térmica emitida por unidade de área ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); ε é a emissividade do material, variando entre 0 e 1 (para um corpo negro idealizado); σ é a constante de Stefan-Boltzmann de valor igual à $5,67 \times 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$); T é a temperatura da superfície ou atmosfera (K).

Na Figura 59, à direita, verifica-se que as diferenças entre a modificação e a simulação controle são todas positivas, o que indica que apesar do maior sombreamento durante o dia devido à maior proximidade dos edifícios, a geometria favoreceu a intensificação do fenômeno de aprisionamento da radiação e um ganho líquido de energia, resultando em temperaturas superficiais mais pronunciadas, principalmente entre o período noturno e as primeiras horas da manhã. As diferenças encontradas variaram entre 0,33°C (às 13h) e 1,44°C (às 06h), com uma média horária de 0,84°C.

Na Figura 60, é possível perceber a redução na velocidade do vento, observada durante todo dia. Em média, a diminuição foi de 13,6% após a modificação. Observa-se que nos horários do dia em que se tem as maiores reduções percentuais da velocidade do vento são verificadas as diferenças mais positivas na temperatura do ar, indicando que o seu retardamento contribuiu para o aumento da temperatura após o incremento da razão H/W, o que interferiu nas condições de ventilação e dissipação de calor.

Verificou-se que uma redução de 20% na larguras das vias ocasionou em aumento da T_{sk} em 3,2%, em média. Já os efeitos na temperatura do ar foram bem menos evidentes, com a manifestação de tendência de resfriamento e aquecimento dependentes do período do dia. É importante ressaltar que como a temperatura do ar também é dependente de outros fatores como a advecção, e nem sempre esta responderá de forma direta. Em vista de tais circunstâncias, é possível dizer que o módulo urbano é sensível às modificações provocadas na geometria do cânion urbano, demandando, portanto, critério em sua adoção.

5.5.2 Aumento da fração urbana

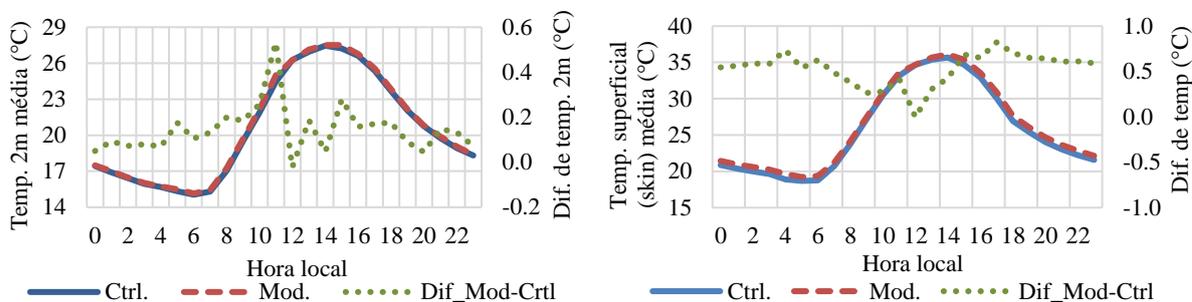
Em condições reais, o aumento da fração urbana representa o adensamento de uma área, com a consequente redução de áreas verdes. Como consequência, espera-se que menos energia seja dissipada em forma de calor latente, favorecendo ou o armazenamento no solo ou a liberação de energia em forma de calor sensível, o primeiro contribuindo para o aquecimento noturno do ar, e o segundo para o aquecimento diurno.

Os efeitos do incremento da fração urbana foram analisados para as zonas de maior (LCZ 1) e menor adensamento (LCZ 9), a fim de se verificar a abrangência da modificação. Presume-se que os resultados das demais zonas se encontrarão entre tal intervalo. A coordenada geográfica referente à LCZ 1 foi mantida do item anterior (próximo à Praça Sete em Belo Horizonte) e a referente à LCZ 9, alocada na área rural da cidade de Santa Luzia.

Na Figura 61, para a classe de maior adensamento e verticalização, foram constatadas diferenças positivas na temperatura do ar, na maior parte do tempo. As variações apresentaram valor máximo de 0,53°C às 11h e mínimo de -0,02°C durante o meio-dia. Em média, um aumento de 10% da fração urbana foi capaz de provocar um incremento na temperatura do ar de 0,14°C. O mesmo comportamento foi verificado para a temperatura superficial do solo, para

o qual o aumento da fração urbana, com a consequente redução da fração vegetada, provocou um incremento médio de $0,53^{\circ}\text{C}$, mais pronunciado durante o período noturno.

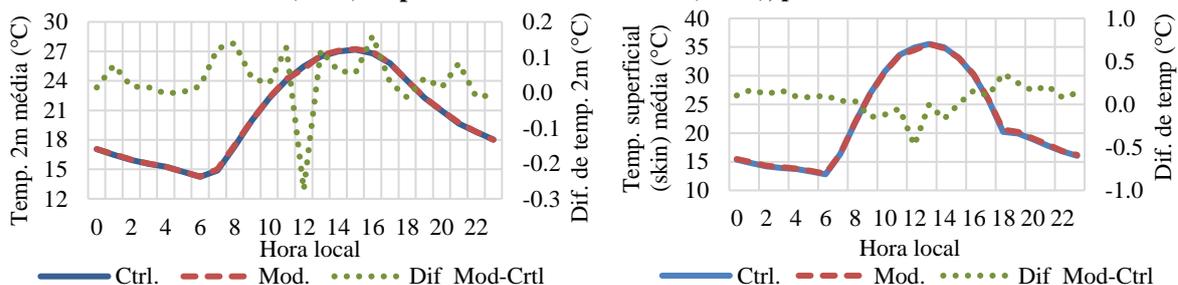
Figura 61: Temperatura a 2m média ($^{\circ}\text{C}$) e superficial (*skin*) média ($^{\circ}\text{C}$) para a fração urbana adotada inicialmente (Ctrl.) e após um aumento de 10% (Mod.), para uma área de LCZ 1.



Na Figura 62, encontram-se os resultados para a área de LCZ 9. Observa-se que para temperatura do ar, os efeitos do aumento da fração urbana foram menos acentuados que aqueles verificados na área classificada como LCZ 1, o que pode ser atribuído às diferenças nos demais parâmetros que caracterizam cada zona, como o albedo e grau de verticalização, além de maior cobertura vegetal para controlar a temperatura. Excluindo-se o período do meio-dia, em que a diferença de temperatura foi de $-0,28^{\circ}\text{C}$, a média horária apresentada para o ar foi de $0,05^{\circ}\text{C}$, cerca de três vezes inferior àquela apresentada para a LCZ 1.

Já para a temperatura da superfície, verifica-se que, ao contrário do que ocorreu para a LCZ 1, nem sempre as variações foram positivas. Assim, o aumento da fração urbana foi capaz de apresentar efeitos distintos dependendo do período do dia. Entre às 09h e às 14h, as tendências apresentadas são de redução da T_{sk} frente ao cenário inicial. Nos demais horários a tendência é de aumento da temperatura, com média horária, para este período, de $0,13^{\circ}\text{C}$. Assim, o aumento de 10% da fração urbana foi capaz de provocar um incremento de somente 0,64% na T_{sk} do período noturno, indicando que não houve grandes modificações no balanço energético das superfícies. Observa-se ainda, que para uma LCZ 9, a temperatura superficial do solo durante a noite se torna próxima à do ar ou até inferior, indicando que em tais áreas o resfriamento noturno é favorecido, ao contrário do que ocorre na LCZ 1.

Figura 62: Temperatura a 2m média (°C) e superficial (*skin*) média (°C) para a fração urbana adotada inicialmente (Ctrl.) e após um aumento de 10% (Mod.), para uma área de LCZ 9.



A partir dos teste de sensibilidade foi possível verificar que, de fato, o BEP é apto a captar as mudanças provocadas pela alteração da geometria e fração urbana, sendo mais ou menos sensível de acordo com a classe de uso e ocupação do solo considerado, como também foi verificado por Brousse *et al.* (2017). Em resumo, pode-se afirmar que o módulo urbano mostrou-se mais sensível às modificações realizadas na geometria urbana. Tal conclusão, foi principalmente baseada nos resultados apresentados pela temperatura da superfície do solo, uma vez esta depende diretamente do balanço radiativo, o qual as alterações visaram alterar.

Visto que o módulo urbano responde de forma sensível aos parâmetros do cânion urbano, é recomendado que estudos futuros testem outros valores além destes aqui adotados e verifiquem se existe melhora na predição dos parâmetros meteorológicos a partir da comparação com os dados observados nas estações de superfície, de forma a diminuir os erros associados à modelagem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar as modificações produzidas pela acoplagem do módulo urbano do BEP no modelo meteorológico WRF, para fins de avaliação da ferramenta e de aplicação no estudo do clima urbano da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Inicialmente, foi realizada a classificação do uso e ocupação do solo da região, para a atualização do banco de dados da versão urbana do modelo. Posteriormente, após a aplicação de diversas parametrizações físicas, foi escolhida aquela combinação mais adequada aos objetivos deste estudo e verificado o seu desempenho. A partir da simulação controle foi possível averiguar as diferenças provocadas pela ativação do modelo de dossel urbano nas variáveis meteorológicas propostas. A sensibilidade do referido modelo foi testada, e por fim, este foi aplicado na simulação de um futuro cenário de expansão da mancha urbana.

As principais constatações referentes à classificação LCZ são referentes ao número de classes disponíveis para a representação da grande heterogeneidade das áreas urbanas presentes na áreas de estudo e à metodologia padrão existente para sua identificação. Como mencionado, a urbanização em países subdesenvolvidos acontece de forma pouco organizada resultando, constantemente, em ocorrências muito heterogêneas para serem enquadradas em qualquer das classes disponíveis na LCZ. Assim, a qualidade da classificação pode ser prejudicada e culminar em uma má representação do uso e ocupação do solo, que em última instância, também pode impactar no desempenho do modelo meteorológico que utilizá-la como dado de entrada. Uma outra limitação relativa à LCZ é a metodologia padrão utilizada na sua obtenção, que favorece a confusão, principalmente, entre as classes urbanas.

Em conjunto com os erros de classificação, a interpolação para a grade de 1 km do modelo meteorológico, com a consequente perda de detalhes, resultou em atribuições pouco realistas para algumas regiões do domínio. Observa-se, então, que os problemas de representação da superfície urbana passam, ainda, por questões de escala. É importante ressaltar, no entanto, que a opção por modelos de meso ou microescala está intimamente relacionado ao objetivo que se deseja atingir, podendo atuar, muitas das vezes, como metodologias complementares.

Avaliando-se os efeitos produzidos a partir da ativação do BEP, observou-se que os resultados provocados na área estudo foram distintos e muito dependentes do uso e ocupação do solo. No entanto, pode-se afirmar que a sua aplicação apresenta potencial na redução do usual viés

positivo da modelagem padrão, revelando que o modelo é sensível aos parâmetros de dossel urbano, como foi constatado nos testes de sensibilidade aplicados. Desta forma, ressalta-se a importância de uma boa seleção de tais parâmetros, que em caso contrário podem até atuar mais como fonte de erros do que de precisão, como foi verificado para algumas estações na RMBH, que tiveram as métricas estatísticas pioradas após a acoplagem do módulo urbano.

Ainda no âmbito das diferenças entre as abordagens padrão e urbana, é importante se desvencilhar do senso comum que a ativação de um esquema de dossel urbano intensifica ou reforça os efeitos das cidades nas condições meteorológicas. Este é tão somente mais completo e realista em representar os processos que nelas ocorrem. Assim, nem todas as considerações adicionadas pelo BEP implicam, por exemplo, no aumento da temperatura, como é o caso da dissipação de calor pela vegetação urbana e o sombreamento causado pelos edifícios devido à geometria característica das cidades. Ademais, as alterações provocadas pela ativação do módulo urbano também dependem muito das características da cidade e de seu potencial de aquecimento, função do adensamento, verticalização e das condições de circulação atmosférica.

Em resumo, a acoplagem de modelos de dossel urbano à modelos meteorológicos apresenta notáveis potencialidades, permitindo o estudo de cenários futuros de urbanização como o simulado neste estudo. A condição proposta, apesar de ter considerado o espalhamento, o adensamento e a verticalização da mancha urbana, buscou representar uma estimativa de crescimento brando. Para as áreas recém-urbanizadas foi verificado um aumento na temperatura, principalmente no período noturno, enquanto nas áreas que sofreram processo de verticalização, as tendências de elevação foram constatadas principalmente durante o dia.

Belo Horizonte ainda é uma cidade jovem quando comparada à outras capitais, como São Paulo e Rio de Janeiro, o que indica que os problemas associados ao processo de urbanização, possivelmente, serão ainda mais intensificados, incluindo aqueles referentes ao clima urbano. Dada a futura conjectura e sua importância atual na vida da população, este estudo buscou trazer uma contribuição para a temática, por meio da avaliação de uma ferramenta ainda não aplicada à RMBH. Espera-se que as limitações e potencialidades do modelo, bem como outros resultados aqui descritos possam auxiliar na condução de análises ulteriores.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Com base nas limitações apontadas na metodologia padrão de classificação LCZ (WUDAPT), é recomendada a sua adaptação a partir do uso de produtos de outros satélites além do Landsat8, para auxiliar na melhor diferenciação entre os tipos urbanos e, conseqüentemente, na obtenção de uma melhor classificação.
- Visto que os dados de radiossondagem não estavam disponíveis para o período de estudo proposto, é aconselhável que a parametrização selecionada seja aplicada à datas próximas que tenham tal dado disponível para averiguar se a opção escolhida é capaz de representar as condições meteorológicas verticalmente, de forma satisfatória.
- Verifica-se, também, a necessidade do teste de outros valores referentes aos parâmetros do cânion urbano utilizados na inicialização do BEP, com intuito de melhorar o desempenho estatístico do modelo uWRF, incluindo o esforço da utilização de mais dados observados/medidos, visto que neste estudo os UCPs foram majoritariamente adotados da literatura.
- A partir da constatação das potencialidades da ferramenta testada, acoplagem de um modelo meteorológico à um módulo urbano, recomenda-se a simulação de outros cenários de expansão da mancha urbana da RMBH, baseando-se em considerações mais realistas como o aumento demográfico previsto para a área em médio e longo prazo, além do posicionamento geográfico mais preciso dos vetores de crescimento.
- Por fim, recomenda-se que a evolução temporal da ilha de calor identificada na região centro-sul de Belo Horizonte seja melhor caracterizada, bem como seja realizada a investigação de núcleos de aquecimento em outras regiões.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, K. A. **Investigation of human-induced land use changes under present and future climate projections in southern Idaho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Boise State University, 2013. 233 p.

ARAKAWA, A.; LAMB, V.R. Computational Design of the Basic Dynamical Process of the UCLA General Circulation Model. **Methods Computational Physics**, v.17, p. 173-265, 1977.

ARENS, K. O Cerrado como Vegetação Oligotrófica. **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Botânica**, v.15, p. 59-77, 1958.

ARNFIELD, A. J. Review - Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **Int. J. Climatol.** v. 23, p. 1–26, 2003.

ASSIS, W. L. **O Sistema Clima Urbano do Município de Belo Horizonte na Perspectiva Tempo-espacial**. Tese (Doutorado em Geografia) . Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. 319 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 15220: **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2003.

BAKARMAN, M. A.; CHANG, J. D. The influence of height/width ratio on urban heat island in hot-arid climates. **Procedia Engineering**, v.118, p. 101 – 108. 2015.

BAKER, D.; DOWNS, T.; KU, M.; HAO, W.; SISTLA, G.; KISS, M.; JOHNSON, M.; BROWN, D. **Sensitivity testing of WRF physics parameterizations for meteorological modeling and protocol in support of regional SIP air quality modeling in the OTR**. Technical report. Ozone Transport Commission, Modeling Committee, Washington, DC, 73 p., 2010. Disponível em: <https://otcair.org/upload/Documents/Meeting%20Materials/OTC%20WRF%20Protocol%203_11_10.pdf>. Acesso em 10 de dez. de 2018.

BANKS, R. F.; TIANA-ALSINA, J.; ROCADENBOSCH, F.; BALDASANO, J. M. Performance Evaluation of the Boundary-Layer Height from Lidar and the Weather Research and Forecasting Model at an Urban Coastal Site in the North-East Iberian Peninsula. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 157, p. 265–292, 2015.

BAPTISTA, P. **Panoramas da Serra do Espinhaço – Um Ensaio de Mapeamento Fotográfico da Paisagem**. Tese (Doutorado em Arte e Tecnologia da Imagem), Programa de Pós-graduação em Artes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 193 p.

BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L.; TORRES, S. C. **Clima e Cidade: a Abordagem Climática como Subsídio para Estudos Urbanos**. Alagoas: edUFAL, 2007. 164 p.

BARSI, J.; SCHOTT, J.; HOOK, S.; RAQUENO, N.; MARKHAM, B.; RADOCINSKI, R. Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. **Remote Sens**, v.6, p. 11607–11626, 2014.

BECHTEL, B.; ALEXANDER, P. J.; BÖHNER, J.; CHING, J.; CONRAD, O.; FEDDEMA, J.; MILLS, G.; SEE, L.; STEWART, I. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, v. 4, p. 199-219, 2015.

BECHTEL, B.; SEE, L.; MILLS, G.; FOLEY, M. Classification of Local Climate Zones Using SAR and Multispectral Data in an Arid Environment. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n.7, p. 3097–3105, 2016.

BELO HORIZONTE. **Lei Municipal nº 8137/00 de 21 de dezembro de 2000**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/lei-ordinaria/2000/813/8137/lei-ordinaria-n-8137-2000-altera-as-leis-n-7165-96-7-166-96-ambas-de-27-de-agosto-de-1996-e-lei-n-7166-96-revoga-a-lei-n-1-301-66-e-da-outras-providencias>>. Acesso em 10 de mar. de 2018.

BELO HORIZONTE. **Plano Diretor de Belo Horizonte: Lei de Uso e Ocupação do Solo - Estudos básicos**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 1995.

BHATI, S.; MOHAN, M. WRF-urban canopy model evaluation for the assessment of heat island and thermal comfort over an urban airshed in India under varying land use/land cover conditions. **Geosci. Lett.**, v. 5:27, p. 1 – 19, 2018.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil (1988)**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRITTER, R.E.; HANNA, S.R. Flow and dispersion in urban areas. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 35, p. 469-496, 2003.

BROUSSE, O.; MARTILLI, A.; FOLEY, M.; MILLS, G.; BECHTEL, B. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. **Urban Climate**, v. 17, p. 116 – 134, 2016.

BROUSSE, O.; BECHTEL, B.; HAMMERBERG, K.; MARTILLI, A.; DEMUZERE, M.; VAN LIPZIG, N. P. M. New Cities' Parameterization for Urban Climate Modelling - A Sensitivity Test to Local Climate Zones Parameters in WRF over Vienna using WUDAPT. **97th AMS Annual Meeting**, 2017, Seattle.

BROWN, M.; GRIMMOND, S.; RATTI, C. **Comparison of methodologies for computing sky view factors in urban environments**. Internal Report Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, p. 6, 2001. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.586.4947&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em 05 de jan. de 2018.

CALLEJAS, J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. A. C. Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas. **E&S - Engineering and Science**, v. 1, n. 3, p. 64 -72, 2015.

CHANGNON JUNIOR, S. A.; HUFF, F. A.; SEMONIN, R. G. METROMEX: an Investigation of Inadvertent Weather Modification. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 52, n. 10, p. 958–968, 1971.

CARLSON, T. N.; DODD, J. K.; BENJAMIN, S. G.; COOPER, J. N. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. **Journal of Applied Meteorology**, v. 20, p. 67-87, 1981.

CASTILLEJO-GONZÁLEZ I. L.; LÓPEZ-GRANADOS F.; GARCÍA-FERRER A.; PEÑABARRAGÁN J. M.; JURADO-EXPÓSITO M.; ORDEN M. S.; GONZÁLEZ-AUDICANA M. Object - and pixel-based analysis for mapping crops and their agroenvironmental associated measures using QuickBird imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p. 207-215, 2009.

CLARKE, S. G.; ZEHNDER, J. A.; LORIDAN, T.; GRIMMOND, C. S. B. Contribution of land use changes to near-surface air temperatures during recent summer extreme heat events in the phoenix metropolitan area. **J. Appl. Meteorol. Climatol.**, v. 49, p. 1649–1664, 2010.

CHEN, F.; H. KUSAKA; R. BORNSTEIN; CHING, J.; GRIMMOND, C.S.B; GROSSMAN-CLARKE, S.; LORIDAN, T.; MANNING, K. W.; MARTILLI, A.; MIAO, S.; SAILOR, D.; SALAMANCA, F. P.; TAHA, H.; TEWARI, M.; WANG, X.; WYSZOGRODZKI, A. A.; ZHANG, C. The Integrated WRF/Urban Modeling System: Development, Evaluation, and Applications to Urban Environmental Problems . **Journal of Climatology**. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, 31(2), p. 273-288, 2011.

CHING, J.; SEE, L.; MILLS, G.; ALEXANDER, P.; BECHTEL, B.; FEDDEMA, J.; OLESON, K. L.; STEWART, I.; NEOPHYTOU, M.; CHEN, F.; WANG, X.; HANNA, A. WUDAPT: Facilitating advanced urban canopy modeling for weather, climate and air quality applications. Presentation, **94th American Meteorological Society Annual Meeting**, United States of America. 2014. Disponível em: <<http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11169/1/XO-14-055.pdf>>. Acesso em 25 de set. de 2017.

CHRISTEN, A. **Atmospheric Turbulence and Surface Energy Exchange in Urban Environments - Results from the Basel Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE)**. Tese (Doutorado em Filosofia). Universidade de Basel, 2005. 142p.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a central european city. **Int. J. Climatol.**, v. 24, p. 1395–1421, 2004.

COHEN, A. R.; CAVALLO, S. M.; CONIGLIO, M. C.; BROOKS, H. E. A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments. **Weather and Forecasting**, v. 34, n. 2, 2015.

COLLATZ, G. J.; BALL, J. T.; GRIVET, C.; BERRY, J. A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.54(2-4), p.107–136, 1991.

DE LA PAZ, D.; BORGE, R.; MARTILLI, A. Assessment of a high resolution annual WRF-BEP/CMAQ simulation for the urban area of Madrid (Spain). **Atmospheric Environment**, v 144, p. 282-296, 2016.

DHIMAN, R. C.; PAHWA, S.; DHILLON, G. P. S.; DASH, A. P. Climate change and threat of vector-borne diseases in India: are we prepared? **Parasitol. Res.**, v. 106, p.763–77, 2010.

DUARTE, R. H. À sombra dos fícus: cidade e natureza em Belo Horizonte. **Ambiente & Sociedade**, v. X, n° 2, p. 25-44, 2007.

DUDHIA, J. **WRF Modeling System Overview**. 2012. Disponível em: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201201/WRF_Overview_Dudhia.ppt.pdf>. Acesso em 22 de fev. de 2018.

DUDHIA, J. Overview of WRF Physics. NCAR, 2016. Disponível em: <<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201601/physics.pdf>>. Acesso em 22 de fev. de 2018.

EMERY, C.; TAI, E.; YARWOOD, G. **Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes**. 2001. Disponível em: <<https://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/air/am/contracts/reports/mm/EnhancedMetModelingAndPerformanceEvaluation.pdf>>. Acesso em 23 de set. de 2017.

FAMELI, K.M.; ASSIMAKOPOULOS, V.D.; KOTRONI, V. On the effect of land use change on the meteorological parameters above the Greater Athens Area. **Advances in meteorology, climatology and atmospheric physics**, p. 73–78, 2013.

FALLMANN, J.; EMEIS, S.; SUPPAN, P. Mitigation of urban heat estresse – a modelling case study for the area of Stuttgart. **DIE ERDE**, v. 144 (3-4), p. 202-216, 2013.

FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S. Simulações de vento e sua aplicação no planejamento urbano. **Revista Ur**, n.8, p. 8 – 17, 2015.

FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S.; KATZSCHNER, L. Construção de um mapa climático analítico para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management)**, v. 9 (Supl. 1), p. 255-270, 2017.

FRANCISCO, R.C. A. **Clima Urbano: Um Estudo Aplicado a Belo Horizonte, MG**. Dissertação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Escola de Arquitetura – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. 140 p.

GALLO, K. P.; EASTERLING, D. R.; PETERSON, T. C. The influence of land use/ land cover on climatological values of the diurnal temperature range. **J. Clim.**, v. 9, p. 2941–2944, 1996.

GARRATT, J. R. Review: the atmospheric boundary layer. **Earth-Science Reviews**, v. 37, p. 89-134, 1994.

GEMIACKI, L. Chuva Mensal em BH/MG: Análise Histórica. In: **XVIII CBMET – Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Recife - PE. 2014.

GILL, D. **Real - Description of General Functions**. 2017. Disponível em: <https://www.climate-science.org.au/sites/default/files/WRF_gill_real.pdf>. Acesso em 02 de abr. de 2017.

GIORDANO, C.; VERNIN, J.; RAMIÓ, H. V.; MUÑOZ-TUÑÓN, M.; VARELA, A. M.; TRINQUET, H. Atmospheric and seeing forecast: WRF model validation with in situ

measurements at ORM. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 430 (4), p. 3102–3111, 2013.

GIOVANNINI, L.; ZARDI, D.; FRANCESCHI, M.; CHEN, F. Numerical simulations of boundary-layer processes and urban-induced alterations in an Alpine valley. **Int. J. Climatol.**, v.34, p. 1111 – 1131, 2014.

GODFREY, C. M.; STENRUD, D. J. An Empirical Latent Heat Flux Parameterization for the Noah Land Surface Model. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, p. 1696 – 1713, 2010.

GOOGLE EARTH. Disponível em:< <https://earth.google.com/web/>>. Acesso em 10 de mar. de 2018.

GUTIÉRREZ, E.; GONZÁLEZ, J. E.; MARTILLI, A.; BORSTEIN, R.; AREND, M. Simulations of a Heat-Wave Event in New York City Using a Multilayer Urban Parameterization. **American Meteorological Society Journal**, v.58, n. 4, p. 283 – 301, 2015.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para Análise de Desempenho de Simulações de Sistemas Convectivos na Região Metropolitana de São Paulo com o Modelo ARPS: Sensibilidade a Variações com os Esquemas de Advecção e Assimilação de Dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n. 4, p. 591 - 608, 2011.

HAMDI, R.; SCHAYES, G. Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. **Int. J. Climatol.**, v. 28, p. 973–982, 2008.

HAMMERBERG, K.; BROUSSE, O.; MARTILLI, A.; MAHDAVIA, A. Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. **Int. J. Climatol.**, v.38, p. e1241–e1257, 2018.

HIRASHIMA, S. Q. S. **Percepção Sonora e Térmica e Avaliação de Conforto em Espaços Urbanos Abertos do Município de Belo Horizonte/MG, Brasil**. Tese de doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

HOLMER, B.; THORSSON, S.; ELIASSON, I. Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature differences. **Geogr. Ann.**, v. 89 A (4), p. 237–248, 2007.

HOMANN, C. T. **Avaliação dos efeitos urbanos sobre circulações de mesoescala em função da expansão territorial da Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 141p.

HUMMEL, J. R. Surface Temperature Sensitivities in a Multiple Cloud Radiative-Convective Model with a Constant and Pressure Dependent Critical Lapse Rate. **Tellus**, v. 34, p. 203-208, 1982.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. **Sinopse do Censo Demográfico de 2010 – Minas Gerais**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=31>>. Acesso em 28 de dez. de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2016a. **IBGE divulga as estimativas populacionais dos municípios em 2016**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/9497-ibge-divulga-as-estimativas-populacionais-dos-municipios-em-2016>>. Acesso em 22 de dez. de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2016b. **Produto Interno Bruto dos Municípios**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/pesquisa/38/46996>>. Acesso em 28 de dez. de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em 22 de fev. de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2018a. **IBGE divulga as Estimativas de População dos municípios para 2018**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22374-ibge-divulga-as-estimativas-de-populacao-dos-municipios-para-2018>>. Acesso em 30 de ago. de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2018b. **Conheça cidades e estados do Brasil**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em 30 de out. de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. 2017. FICHA DE INSPEÇÃO Nº:41/2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Estações Automáticas**. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em 10 de dezembro. de 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Normais climatológicas do Brasil 1981-2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso 10 de dez. de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Boletim Técnico**. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso 10 de jan. de 2018.

IRIZA, A.; R.C. DUMITRACHE, R. C.; ŞTEFAN, S. Numerical Modelling of the Bucharest Urban Heat Island with the WRF-Urban System. **Romanian Journal of Physics**, v. 62, n. 810, 2017.

IVANAUSKAS, N. M. **Estudo da vegetação na área de contato entre formações florestais em Gaúcha do Norte-MT**. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal), Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. 201p.

JANDAGHIAN, Z.; TOUCHAEI, A. G.; AKBARI, H. Sensitivity analysis of physical parameterizations in WRF for urban climate simulations and heat island mitigation in Montreal. **Urban Climate**, v. 24, p. 577-599, 2017.

JÄNICKE, B.; MEIER, F.; FENNER, D.; FEHRENBACH, U.; HOLTMANN, A.; SCHERER, D. Urban–rural differences in near-surface air temperature as resolved by the central Europe refined analysis (CER): sensitivity to planetary boundary layer schemes and urban canopy models. **Int. J. Climatol.**, v. 37(4), p. 2063–2079, 2016.

JARDIM, C. H.; SILVA, M. R. Extremos de temperatura do ar em Belo Horizonte: Variabilidade natural e influência do clima urbano. **Revista do Departamento de Geografia USP**, Volume Especial (2016), v. 83-97, 2016.

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J. On the Ability of the WRF Model to Reproduce the Surface Wind Direction over Complex Terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, p. 1610 – 1617, 2013.

KAPLAN, S.; GEORGESCU, M.; ALFASIL, N.; KLOOG, I. Impact of future urbanization on a hot summer: a case study of Israel. **Theor Appl Climatol**, v.128, p. 325–341, 2017.

KOOMEN, E.; DIOGO, V. Assessing potential future urban heat island patterns following climate scenarios, socio-economic developments and spatial planning strategies. **Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change**, v. 22, p. 287–306, 2017.

KUMAR, P.; MORAWSKA, L.; MARTANI, C.; BISKOS, G.; NEOPHYTOU, M.; DI SABATINO, S.; BELL, M.; NORFORD, L.; BRITTER, R. The Rise of Low-Cost Sensing for Managing Air Pollution in Cities. **Environment International**, v.75, 199-205. 2015.

KUSAKA, H.; KONDO, H.; KIKEGAWA, Y.; KIMURA, F. A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-Layer and Slab Models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 101, p. 329–358, 2001.

KUSAKA, H.; KIMURA, F. Coupling a Single-Layer Urban Canopy Model with a Simple Atmospheric Model: Impact on Urban Heat Island Simulation for an Idealized Case. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 82, n°1, p. 67-80, 2004.

LEE, S.-H.; KIM, S.-W.; ANGEVINE, W. M.; BIANCO, L.; MCKEEN, S. A.; SENFF, C. J.; TRAINER, M.; TUCKER, S. C.; ZAMORA, R. J. Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study 2006 field campaign. **Atmos. Chem. Phys.**, v.11, p. 2127 – 2143, 2011.

LEE, C. B.; KIM, J.-C., BELORID, M.; ZHAO, P. Performance Evaluation of Four Different Land Surface Models in WRF. **Asian Journal of Atmospheric Environment**, v. 10-1, p. 42-50, 2016.

LI, X.; KOH, T.; PANDA, J.; NORFORD, L. K. Impact of urbanization patterns on the local climate of a tropical city, Singapore: An ensemble study. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 121, p. 4386–4403, 2016.

LIMA, E. P.; SEDIYAMA, G. C.; GLERIANI, J. M.; SOARES, V. P.; DELGADO, R. C.; ANDRADE, R. G. Estimativa do balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagem do Landsat 5 - TM. **In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, 14, 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 255-262.

LIU, Y.; CHEN, F.; WARNER, T.; BASARA, J. Verification of a mesoscale data assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the Joint Urban 2003 Field Project. **J. Appl. Meteor.**, v.45, p. 912–929, 2006.

LIU, J.; GAO, Z.; WANG, L.; LI, Y.; GAO, C. Y. The impact of urbanization on wind speed and surface aerodynamic characteristics in Beijing during 1991–2011. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 130, p. 311–324, 2018.

MACEDO, D. R.; UMBELINO, G. Análise espacial da evolução da urbanização em Belo Horizonte (1918-2010) e suas relações com os indicadores de renda e estrutura etária nos Censos de 2000 e 2010. **In: XX Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, 2016. Foz do Iguaçu. Anais... ABEP, 2016, p. 852 – 865.

MAITELLI, G. T. Balanço de Energia Estimado para a cidade de Cuiabá: Uma Abordagem de Balanço de Energia pelo Método de Bowen. **FÓRUM | Clima Urbano e Planejamento das Cidades**, v. 3, n. 2, 2010.

MARTILLI, A.; CLARKE, S. G.; TEWARI, M.; MANNING, K. W. **Description of the modification made un WRF.3.1 and short user's manual of BEP**. 2009.

MARTILLI, A.; BROUSSE, O., CHING, J. **Urbanized WRF modeling using WUDAPT - Web version: March 2016**. Disponível em: <<http://www.wudapt.org/wpcontent/uploads/2016/05/Urbanized-WRF-modeling-using-WUDAPT-web-version-March2016.pdf>>. Acesso em 30 de out. de 2017.

MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M. W. An Urban Surface Exchange Parameterization for Mesoscale Models. **Bound. Layer Meteorol.**, v. 104, p. 261-304, 2002.

MILLARD, K.; RICHARDSON, M. On the Importance of Training Data Sample Selection in Random Forest Image Classification: A Case Study in Peatland Ecosystem Mapping. **Remote Sens.**, v. 7(7), p. 8489-8515, 2015.

MINAS GERAIS. **Plano Metropolitano RMBH**. 2010. Disponível em:<http://www.rmbh.org.br/arquivos_biblioteca/CAC_Gestao-Paisagem_PDDI_Dez2010.pdf>. Acesso em 10 de jan. de 2018.

MOHANTY, U.C; GOPALAKRISHNAN, S.G. **Advanced Numerical Modeling and Data Assimilation Techniques for Tropical Cyclone Predictions**. 1ªed. Nova Deli, Índia: Springer, 2016.

MÖLDERS, N. **Land-Use and Land-Cover Changes - Impact on Climate and Air Quality**. Springer, 2012. 189 p.

MONTEIRO, J. R. V.; LEDER, S. M. A aplicação da Termografia como ferramenta de investigação térmica no espaço urbano. **VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis** – Vitória/ ES. 7 a 9 de set., 2011.

MUGHAL, M. O.; LYNCH, M.; YU, F.; MCGANN, B.; JEANNERET, F.; SUTTON, J. Wind modelling, validation and sensitivity study using Weather Research and Forecasting model in complex terrain. **Environmental Modelling & Software**, v. 90, p. 107-125, 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Urban Meteorology: Forecasting, Monitoring, and Meeting Users' Needs**. Washington, DC: The National Academies Press. 2012. 190 p.

NEDBOR-GROSS, R.; HENDERSON, B. H.; DAVIS, J. R. Comparing Standard to Feature-Based Meteorological Model Evaluation Techniques in Bogotá, Colombia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 58, n. 4, p. 391 – 413, 2017.

NICHOL, J. An Emissivity Modulation Method for Spatial Enhancement of Thermal Satellite Images in Urban Heat Island Analysis. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 75, n. 5, p. 547–556, 2009.

NUNES, A. B. **Crescimento da Camada Limite Convectiva: Estudo Analítico e Numérico**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Programa Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. 194p.

NUNES, A. A.; PINTO, E. J. A.; BAPTISTA, M. B. Análise de Tendência para Eventos Extremos de Precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-519_identificacao-de-tendencias-para-eventos-extremos-de-precipitacao-na-regiao-metropolitana-de-belo-horizonte-a-partir-de-metodos-estatisticos>. Acesso em 05 de mar. de 2018.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, p. 11-19, 1977.

OFFERLE, B.; GRIMMOND, C.; FORTUNIAK, K.; KLYSIK, K.; OKE, T. R. Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 84, p. 103–115, 2006.

OKE, T. R. City Size and The Urban Heat Island. **Atmospheric Environment Pergamon Press**, v. 7, p. 769 – 779, 1973.

OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Heat Island: comparisons of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 3, p. 237-254, 1981.

OKE, T. R.; MILLS, G.; VOOGT, J. A. **Urban Climate**. Cambridge University Press, 2017. 485 p.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. Routledge 2nd ed., 1987. 460 p.

OLIVEIRA, E. A. M. **A imigração italiana e a organização operária em Belo Horizonte nas primeiras décadas do século XX**. Monografia (Especialização em História) – Faculdades

Integradas de Pedro Leopoldo, Centro de Pós Graduação, Pedro Leopoldo, 2004. 93p.

OLIVEIRA, O. A. B.; OLIVITO, J. P. R.; RODRIGUES-SILVA, D. Caracterização da Unidade Espelológica e das Unidades Geomorfológicas da Região do Quadrilátero Ferrífero – MG. **Espeleo-Tema**. v. 22, n. 1. 2011. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v22_n1_061-080.pdf>. Acesso em 03 de fev. de 2018.

OLIVEIRA, E. M. G. **Parametrizações Convectivas no Modelo WRF e sua Relação com a Precipitação Durante Ciclogêneses no Sudeste da América do Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2014. 95 p.

PEDRUZZI, R. **Avaliação de desempenho do modelo fotoquímico CMAQ utilizando diferentes condições de contorno em uma região urbana e industrializada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. 131p.

PENG, S.; PIAO, S.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; OTTLE, C.; BRE, F.; NAN, H.; ZHOU, L.; MUNENI, R. B. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. **Environ. Sci. Technol.** 2012, v. 46, p. 696–703.

PETTERSEN, S. **Weather Analysis and Forecasting**. 2nd ed., v.1, New York: McGraw-Hill. 428 p.

PIRINGER, M. e JOFFRE, S. **The Urban Surface Energy Budget and Mixing Height in European Cities: Data, Models and Challenges for Urban Meteorology and Air Quality**. Demetra Ltd Publishers, 2005. 243 p. Disponível em: <http://www.dmu.dk/atmosphericenvironment/cost/docs/WG2_final.pdf>. Acesso em: 02 de fev. de 2018.

PLEIM, J.; RAN, L. Surface flux modeling for air quality applications. **Atmosphere**, v.2 , p. 271–302, 2011.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. **Cartilha de padronização de passeios para o município de Belo Horizonte**. 2014. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/noticia/padrao_passeios_bh_r013_v160114.pdf>. Acesso em 04 de set. de 2018.

RASHED, T.; JÜRGENS, C. **Remote Sensing of Urban and Suburban Areas**. CBS Publishers, New Delhi, India. 2010. 352 p.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **TERRÆ DIDÁTICA**, v. 8(1), p. 34-50. 2012.

REBOITA, M. S.; ASSIREU, A.; SILVA, L. C.; RIOS, N. Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá – MG. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 1, p. 061-071, 2014.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos Climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.17, p. 206 – 226. 2015.

REBOREDO, B.; ARASA, R.; CODINA, B. Evaluating Sensitivity to Different Options and Parameterizations of a Coupled Air Quality Modelling System over Bogotá, Colombia. Part I: WRF Model Configuration. **Open Journal of Air Pollution**, v.4, p. 47-64, 2015.

REUTER, D. C.; RICHARDSON, C. M.; PELLERANO, F. A.; IRONS, J. R.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M.; JHABVALA, M. D.; LUNSFORD, A. W.; MONTANARO, M.; SMITH, R. L.; TESFAYE, Z. The thermal infrared sensor (TIRS) on Landsat 8: Design overview and pre-launch characterization. **Remote Sensing**, v. 7(1), p. 1135–1153, 2015.

RIO DE JANEIRO. Defesa Civil. **Escala da Força dos Ventos de Beaufort**. 2018. Disponível em: <<http://www0.rio.rj.gov.br/defesacivil/ventos.htm>>. Acesso em 19 novembro de 2018.

RODRIGUEZ-GALIANO, V. F.; GHIMIRE, B.; ROGAN, J.; CHICA-OLMO, M.; RIGOL-SANCHEZ, J. P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 67, p. 93-104, 2012.

ROTACH, M. W. Overview on the Basel Urban Boundary Layer Experiment – BUBBLE. **Fourth Symposium on the Urban Environment**, American Meteorological Society. 2002.

ROULET, Y. F. **Validation and Application of an Urban Turbulence Parameterisation Scheme For Mesoscale Atmospheric Models**. Tese (Doutorado em Ciências Técnicas), Instituto de Ciência e Tecnologia Ambiental, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2004. 224p.

RUMAN, C. J. **Caracterização numérica do balanço de energia na superfície durante condições de verão na região da estação Antártica Brasileira**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. 58p.

SAILOR, D. J.; GEORGESCU, M.; MILNE, M. J.; HART, M.A. Development of a National Anthropogenic Heating Database with an Extrapolation for International Cities. **Atmospheric Environment**, v.118, p.7-18, 2015.

SALAMANCA, F.; GEORGESCU, M.; MAHALOV, A.; MOUSTAOU, M.; WANG, M. Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 119, p. 5949–5965, 2014.

SALAMANCA, F.; ZHANG, Y.; BARLAGE, M.; CHEN, F.; MAHALOV, A.; MIAO, S. Evaluation of the WRF-Urban Modelling System Coupled to Noah and Noah-MP Land Surface Models Over a Semiarid Urban Environment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, p. 2387 – 2408, 2018.

SANTAMOURIS, M. **Energy and Climate in the Urban Built Environment**. Nova York: Routledge, 2011.401 p.

SANTIAGO, A. **Simulação da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória com o Uso do Modelo de Mesoescala WRF**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009. 139p.

SANTOS, P. J. A. **Disponibilidades hídricas subterrâneas como subsídio ao plano diretor de abastecimento da Região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**. 2016. Disponível em:<<http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2016/06/MARIA-Pontecialidades-agua-subterranea-RMBH.pdf>>. Acesso em 10 de nov. de 2018.

SARMIENTO, D. P.; DAVIS, K. J.; DENG, A.; LAUVAUX, T.; BREWER, A.; HARDESTY, M. A comprehensive assessment of land surface-atmosphere interactions in a WRF/Urban modeling system for Indianapolis, IN. **Elem. Sci. Anth.**, v.5, n.23, p. 1-22, 2017.

SATI, A. P.; MOHAN, M. The impact of urbanization during half a century on surface meteorology based on WRF model simulations over National Capital Region, India. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 134, p. 309–323, 2018.

ŠAVLI, M. **Turbulence kinetic energy – TKE**. University of Ljubljana. 2012. Disponível em: <http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2011_2012/MaticSavli_2.pdf>. Acesso em 04 de mai. de 2018.

SCHUCH, D.; FISCH, G. The use of an atmospheric model to simulate the rocket exhaust effluents transport and dispersion for the Centro de Lançamento de Alcântara. **J. Aerosp. Technol. Manag.**, v. 9, n.2, p. 137-146, 2017.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**. 3rded, John Wiley & Sons. 2016.1232 p.

SEINO, N.; AOYAGI, T.; TSUGUTI, H. Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation? **Urban Climate**, v. 23, p. 8–35, 2018.

SHARMA, A.; FERNANDO, H. J. S.; HELLMANN, J.; CHEN, F. (2014). Sensitivity of WRF Model to Urban Parameterizations, With Applications to Chicago Metropolitan Urban Heat Island. **4th Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting - FEDSM14**. 2014.

SHIMADA, S.; OHSAWA, T.; CHIKAOKA, S.; KOZAI, K. Accuracy of the Wind Speed Profile in the Lower PBL as Simulated by the WRF Model. **SOLA**, v. 7, p. 109–112, 2011.

SILVA, A. F. G.; FISCH, G. Avaliação do modelo WRF para a previsão do perfil do vento no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, p. 259 - 270, 2014.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GIL, D.O.; BARKER, D.M.; DUDA, M.G.; HUANG, X.; WANG, W; POWERS, J.G. **A description of the advanced research WRF version 3**. NCAR/TN 475+STR Tech. Note, Colorado, USA, 2008.

SOLBAKKEN, K.; BIRKELUND, Y. Evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model with respect to wind in complex terrain. **IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1102**, p. 1 – 10, 2018.

SONG, H.-J.; SOHN, B.-J. An Evaluation of WRF Microphysics Schemes for Simulating the Warm-Type Heavy Rain over the Korean Peninsula. **Asia-Pac. J. Atmos. Sci.**, v. 54(2), p. 225-236, 2018.

SONG, X.; ZHANG, J.; AGHAKOUCHAK, A.; ROY, S. S.; XUAN, Y.; WANG, G.; HE, R.; WANG, X.; LIU, C. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 119, 11250–11271, 2014.

STEWART, I.D; OKE, T.R. A New Classification System for Urban Climate Sites. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 90 (7), p. 922–923, 2009.

STENSRUD, D. **Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 480 p.

STEWART, I.D; OKE, T.R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** p. 1880–1902, 2012.

STEWART, I. D.; OKE, T. R.; KRAYENHOFF, S. Evaluation of the ‘local climate zone’ scheme using temperature observations and model simulations. **Int. J. Climatol.**, v. 34, p. 1062–1080, 2014.

STONE, B. **The city and the coming climate: Climate change in the places we live**. Cambridge University Press, New York, 2012. 198 p.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic Publishers, 1988. 340 p.

STULL, R. B. **Meteorology for Scientists & Engineers**, 3rd ed. Univ. of British Columbia, 2011. 938 p.

SUN, Y.; ZHANG, X.; REN, G.; ZWIERS, F. W.; HU, T. Contribution of urbanization to warming in China. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 706–709, 2016.

TAN, J.; ZHENG, Y.; TANG, X.; GUO, C.; LI, L.; SONG, G.; ZHEN, X.; YUAN, D.; KALKSTEIN, A. J.; LI, F.; CHEN, H. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. **Int. J. Biometeorol.**, v. 54, p. 75–84, 2010.

TANG, G.; ZHANG, J.; ZHU, X.; SONG, T.; MÜNKEL, C.; HU, B.; SCHÄFER, K.; LIU, Z.; ZHANG, J.; WANG, L.; XIN, J.; SUPPAN, P.; WANG, Y. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China, **Atmos. Chem. Phys.**, v. 16, p. 2459-2475, 2016.

UNITED NATIONS – UN. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision – Key Facts**. 2018. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>>. Acesso em 23 de dez. de 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Climate Change Indicators in the United States: Heat-Related Deaths**. 2016. Disponível em:

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/print_heat-deaths-2016.pdf>. Acesso em 15 de out. de 2017.

UNIVERSITY OF WISCONSIN-MILWAUKEE – UWM. **Microphysical Parameterization**. 2018. Disponível em: <<http://derecho.math.uwm.edu/classes/NWP/10-Microphysics.pdf>>. Acesso em 12 de nov. de 2018.

VERDONCK, M-L.; OKUJENI, A.; VAN DER LINDEN, S.; DEMUZERE, M.; DE WULF, R.; VAN COILLIE, F. Influence of neighbourhood information on “Local Climate Zone” mapping in heterogeneous cities. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 62, p. 102–113, 2017.

VILELA, J. A.; ASSIS, E. S.; PAIVA, J. E. M. Variáveis do clima urbano: análise da situação atual e prognósticos para a região do bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG. **In: X Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**. Natal, 2009. p. 295 – 304.

VINNICHENKO, N. K.; PINUS, N. Z.; SHMETER, S. M.; SHUR, G. N. **Cap.6: Atmospheric Convection and Thermal Turbulence**. Springer Science & Business Media. 2013. p.145-164.

WANG, H.; HE, S.; LIU, X.; DAI, L.; PAN, P.; HONG, S.; ZHANG, W. Simulating urban expansion using a cloud based cellular automata model: A case study of Jiangxia, Wuhan, China. **Landscape and Urban Planning**, v.110, p. 99–112, 2013.

WANG, R.; REN, C.; XU, Y.; LAU, K.K.; SHI, Y. Mapping the Local Climate Zones of Urban Areas by Gis-Based and WUDAPT Methods: A Case Study Of Hong Kong. **Urban Climate**, 2017.

WERNER, K.; WANG, W. **Nesting in WRF**. 2012. Disponível em: <https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/wrf_tutorial_2012_brazil/WRF_nesting.pdf>. Acesso em 02 de abr. de 2017.

WERNER, K.; WANG, W. **Nesting in WRF**. 2017. Disponível em: <https://www.climate-science.org.au/sites/default/files/werner_nesting.pdf>. Acesso em 02 de abr. de 2017.

WILLMOTT, C. J. On the evaluation of model performance in physical geography. **Statistics and Models**. Springer, 1984. p. 443-460.

WOOLSON, R. F. Wilcoxon Signed-Rank Test. **Wiley Encyclopedia of Clinical Trials**, p. 1 -3, 2008.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**., 7th ed. 2008. Disponível em:<<https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>>. Acesso em Acesso em 02 de ago. de 2018.

WYSZOGRODZKI, A. A.; MIAO, S.; CHEN, F. Evaluation of the Coupling Between Mesoscale-WRF and LES-EULAG Models for Simulating Fine-Scale Urban Dispersion. **Atmospheric Research**, v. 118, 324–345, 2012.

XIA, Y.; EK, M. B.; WU, Y.; FORD, T.; QUIRING, S. M. Comparison of NLDAS-2 Simulated and NASMD Observed Daily Soil Moisture. Part II: Impact of Soil Texture Classification and Vegetation Type Mismatches. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16(5), p. 1981 – 2000, 2015.

XU, Y.; REN, C.; CAI, M.; EDWARD, N. Y. Y.; WU, T. Classification of Local Climate Zones Using ASTER and Landsat Data for High-Density Cities. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.10(7), p. 3397 – 3405, 2017.

YU, L.; LIU, Y. The possible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v.120, p. 8132–8143, 2015.

ZHAO, W. **Study of the Radiation and Energy Balances Reproduced by WRF Using 10-year (2001-2010) Observations at Cabauw**. Dissertation (MSc thesis Meteorology and Air Quality), Wageningen University, Wageningen, 2013. 41p.

APÊNDICE

Tabela a: Parametrização P13

Parâmetro meteorológico	Índice	Benchmark	Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
Temperatura (2m)	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	0.59	0.39	-0.13	0.20	-1.02
	MAGE (K)	≤ 2.00	1.46	1.41	0.99	1.02	1.24
	IOA	≥ 0.80	0.97	0.97	0.98	0.98	0.97
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	1.86	0.99	2.32	0.32	3.53
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.41	2.34	2.62	1.68	4.11
Direção do vento (10m)	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	3.62	21.73	-2.16	-4.07	20.43
	MAGE (°)	≤ 30.00	40.98	40.93	21.67	22.79	30.81
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	$\leq \pm 1.00$	0.36	0.45	0.43	0.28	0.37
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	1.02	1.23	1.24	1.15	1.06
	IOA	≥ 0.60	0.72	0.58	0.64	0.62	0.64

Tabela b: Parametrização P14

Parâmetro meteorológico	Índice	Benchmark	Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
Temperatura (2m)	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	0.89	0.54	-0.19	0.15	-0.93
	MAGE (K)	≤ 2.00	1.61	0.95	0.86	1.17	1.14
	IOA	≥ 0.80	0.96	0.98	0.98	0.97	0.97
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	1.46	-0.09	1.10	-1.39	1.77
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.08	1.48	1.57	2.16	2.52
Direção do vento (10m)	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	1.56	15.80	-1.73	-2.51	20.36
	MAGE (°)	≤ 30.00	38.50	33.70	23.32	21.33	29.90
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	$\leq \pm 1.00$	0.06	0.12	0.13	-0.04	0.07
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.67	0.85	0.88	0.86	0.72
	IOA	≥ 0.60	0.85	0.75	0.78	0.75	0.80

Tabela c: Parametrização P15

Parâmetro meteorológico	Índice	Benchmark	Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
Temperatura (2m)	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	0.75	0.56	0.13	0.48	-0.77
	MAGE (K)	≤ 2.00	1.49	1.29	0.93	1.16	1.05
	IOA	≥ 0.80	0.97	0.97	0.98	0.97	0.98
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	1.84	1.19	2.30	0.25	3.53
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.47	2.37	2.62	1.74	4.03
Direção do vento (10m)	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	1.92	21.85	-2.86	-1.57	20.78
	MAGE (°)	≤ 30.00	41.71	41.06	24.32	22.94	30.41
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	$\leq \pm 1.00$	0.26	0.34	0.39	0.18	0.30
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.75	0.91	1.06	0.92	0.92
	IOA	≥ 0.60	0.80	0.68	0.68	0.68	0.67

Tabela d: Parametrização P17

Parâmetro meteorológico	Índice	Benchmark	Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
Temperatura (2m)	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	1.01	0.64	-0.25	0.12	-1.01
	MAGE (K)	≤ 2.00	1.50	1.05	0.76	0.96	1.18
	IOA	≥ 0.80	0.97	0.98	0.99	0.98	0.97
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	1.93	1.03	2.06	0.20	3.18
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.63	2.15	2.89	1.78	4.13
Direção do vento (10m)	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	-16.53	11.82	-10.64	-11.98	19.77
	MAGE (°)	≤ 30.00	46.03	33.94	24.46	21.25	28.65
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	$\leq \pm 1.00$	0.32	0.30	0.29	0.07	0.11
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.94	0.99	0.90	0.94	0.84
	IOA	≥ 0.60	0.75	0.64	0.73	0.71	0.74

Tabela e: Parametrização P23

Parâmetro meteorológico	Índice	Benchmark	Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
Temperatura (2m)	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	0.57	0.26	-0.57	-0.20	-1.35
	MAGE (K)	≤ 2.00	1.58	0.92	0.99	1.19	1.48
	IOA	≥ 0.80	0.96	0.98	0.98	0.97	0.96
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	1.33	-0.29	0.87	-1.58	0.80
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	1.87	1.56	1.38	2.36	1.74
Direção do vento (10m)	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	5.25	13.47	-0.26	-3.81	22.67
	MAGE (°)	≤ 30.00	37.97	34.34	22.82	20.92	31.30
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	$\leq \pm 1.00$	0.01	0.23	0.27	0.04	0.13
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.92	1.12	1.14	1.12	0.93
	IOA	≥ 0.60	0.79	0.67	0.71	0.68	0.73

Tabela f: Correspondente urbana da parametrização P17, modelada pelo uWRF – U1

Parâmetro meteorológico	Índice	Benchmark	Sete Lagoas	Confins	Pampulha	Cercadinho	Ibirité
Temperatura (2m)	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	1.09	0.83	-0.66	0.55	-0.98
	MAGE (K)	≤ 2.00	1.62	1.39	1.04	1.04	1.15
	IOA	≥ 0.80	0.96	0.96	0.98	0.98	0.97
Velocidade do vento (10m)	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	2.00	-1.50	-0.16	-3.72	3.06
	RMSE (m.s ⁻¹)	≤ 2.00	2.74	1.90	0.89	4.07	4.01
Direção do vento (10m)	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	-18.23	11.19	-8.38	-13.29	19.51
	MAGE (°)	≤ 30.00	44.27	36.26	24.63	24.63	28.25
Umidade específica (2m)	MB (g.kg ⁻¹)	$\leq \pm 1.00$	0.36	0.33	0.33	0.15	0.12
	MAGE (g.kg ⁻¹)	≤ 2.00	0.90	0.94	0.89	0.86	0.83
	IOA	≥ 0.60	0.77	0.66	0.75	0.73	0.76