UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE

ARISSA SARY UMEZAKI

**Estudo numérico das características da ilha de calor urbana da Região
Metropolitana de São Paulo: o caso de 2014**

São Paulo
2020

ARISSA SARY UMEZAKI

**Estudo numérico das características da ilha de calor urbana da Região
Metropolitana de São Paulo: o caso de 2014**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade.

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 09 de março de 2020. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH/USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Área de Concentração:
Ciência, Tecnologia e Gestão para a
Sustentabilidade

Orientadora:
Prof.^a Dr.^a Flávia Noronha Dutra Ribeiro

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

(Universidade de São Paulo. Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Biblioteca)

CRB 8 - 4936

Umezaki, Arissa Sary

Estudo numérico das características da ilha de calor urbana da região metropolitana de São Paulo: o caso de 2014 / Arissa Sary Umezaki ; orientadora, Flávia Noronha Dutra Ribeiro. – 2020
131 f : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo
Versão corrigida

1. Temperatura atmosférica - Variação. 2. Mudança climática. 3. Ilha de calor urbano - São Paulo (SP) - 2014. 4. Sustentabilidade. 5. Balanço de energia. 6. Verão. 7. Climatologia. I. Ribeiro, Flávia Noronha Dutra, orient. II. Título

CDD 22.ed. – 551.6

Nome: UMEZAKI, Arissa Sary

Título: Estudo numérico das características da ilha de calor urbana da Região Metropolitana de São Paulo: o caso de 2014

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade

Área de Concentração:
Ciência, Tecnologia e Gestão para a Sustentabilidade

Aprovado em: 09 / 03 / 2020

Banca Examinadora

Profa. Dra. Regina Maura de Miranda
Universidade de São Paulo. Escola de Artes, Ciências e Humanidades

Profa. Dra. Jacyra Ramos Soares
Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Profa. Dra. Cláudia Boian
Universidade Federal do ABC. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

Dedico este trabalho aos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a Deus por ter colocado no meu caminho pessoas e oportunidades que me ajudaram a crescer e chegar até aqui. E claro, gostaria de agradecer também a todas as pessoas que me auxiliaram durante a caminhada. Imagino que não haja espaço suficiente e talvez me falte memória para lembrar de todos que deixaram algo de bom comigo, por isso, limitarei este espaço para expressar meus agradecimentos a pessoas que estiveram mais presentes nos meus tempos como pós-graduanda.

Nesta minha lista não poderiam faltar as pessoas que moram comigo: Inácio, Lilia, Luan e Carol. Agradeço aos meus pais por todo suporte oferecido que vai muito mais além do financeiro. Agradeço aos meus irmãos pelo companheirismo, pois é com eles que compartilho ideias de qualquer tipo. Apesar de não entenderem muito bem meu gosto pela pesquisa, minha família sabe ter paciência comigo nos momentos em que os prazos apertam e o desespero toma conta, inclusive os cachorros de casa: Marley e Billy.

Meus agradecimentos também à pessoa que teve participação imensa para que eu tivesse condições de finalizar esta dissertação, a minha orientadora, professora Flávia. Agradeço a dedicação e paciência ao me orientar desde o projeto de iniciação científica, por ter oferecido oportunidades que me permitiram adquirir conhecimento científico e para a vida e, sobretudo, por ter acreditado em mim.

Gostaria de agradecer aos professores que conheci durante o meu período como pós-graduanda por toda a dedicação e transmissão de conhecimento. Também agradeço aos meus colegas da pós por enriquecerem este percurso pelo compartilhamento de conhecimentos, ideias, frustrações e risadas. Agradecimentos especiais aos colegas representantes discentes das gestões passadas e atual, pois, sem a dedicação deles o nosso curso não seria o mesmo.

Dedico este espaço também para agradecer parentes e amigos por momentos divertidos e que em alguma ocasião me disseram “vai dar certo”. Preciso fazer um agradecimento especial a minha tia Ná por ter encontrado tempo, até mesmo onde ele não existia, para tratar problemas causados pela minha má postura nesta reta final de finalização da dissertação.

Por fim, gostaria de expressar meus agradecimentos àqueles a quem dediquei este trabalho, os meus avós, pessoas comuns, mas especiais para mim.

Eles me fazem refletir sobre o quão podemos ser seres frágeis e fortes ao mesmo tempo. Com o avançar dos anos vi meus avós se tornarem dependentes de ajuda externa. Vi a fragilidade nas limitações físicas e nas consequências emocionais que ela trouxe. Mas, nas figuras frágeis dos meus avós vi o quanto eles são fortes ao se adaptarem e compreenderem novas realidades.

Agradeço aos meus avós por tudo que aprendi com eles e por acreditarem na minha capacidade.

A maior parte deles já está em algum outro lugar, mas os guardo comigo por meio das boas lembranças deixadas.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO

UMEZAKI, Arissa Sary. **Estudo numérico das características da ilha de calor urbana da Região Metropolitana de São Paulo**: o caso de 2014. 2020. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Versão corrigida.

A tendência de aumento nas temperaturas médias e o movimento de expansão urbana poderiam exacerbar problemas característicos já existentes na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Dentre os problemas, destaca-se a ilha de calor urbana (ICU) que pode apresentar comportamentos diferentes sob a atuação de eventos meteorológicos de escalas maiores. Em razão disso, o presente trabalho objetivou, por meio de modelagem numérica, investigar a ICU na RMSP sob a atuação de uma massa de ar quente e seca vista em janeiro de 2014, período marcado por altas temperaturas e baixa precipitação. Para isso, foi utilizado o modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting* (WRF), com o núcleo de pesquisa *Advanced Research*, versão 3.8.1 para fazer simulações de temperatura do ar próxima à superfície e de componentes de balanço de energia. A análise procurou diferenciar o padrão da intensidade de uma ICU considerada típica, utilizando a média de temperatura de janeiros entre 2004 a 2013, e compará-la a ICU atípica, correspondente a janeiro de 2014. Resultados indicaram que o ambiente urbano responde termicamente de forma mais lenta que o rural, produzindo uma diminuição acentuada da ICU após o nascer do sol e aumento acentuado da intensidade da ICU ao pôr do sol. Isto causou uma ICU mínima durante a manhã e máxima no período noturno. Este comportamento da ICU durante a manhã foi justificado devido à maior admitância térmica e efeito de sombreamento no ambiente urbano e a altura da camada limite mais baixa no ambiente rural. À noite, os principais fatores apontados para o aumento da intensidade da ICU foram a maior quantidade de liberação de calor armazenado e efeito de obstrução causada pelas construções para a perda de calor no ambiente urbano. Também foram observadas diferenças na intensidade da ICU em resposta a diferentes condições atmosféricas, sendo que a brisa do mar aparentou ter sido o fenômeno que causou maior variação na ICU durante o mês de janeiro. Por meio da comparação entre a ICU típica e atípica não foram notadas mudanças no padrão de comportamento, porém foram vistas variações de temperatura maiores durante janeiro de 2014. Isto resultou em uma ICU atípica menos intensa durante o

período diurno e ICU mais intensa durante o período noturno. As maiores variações de temperatura em janeiro de 2014 foram justificadas pela menor umidade vista no período. Dessa forma, observou-se sinergia entre a ICU e o evento atípico produzido pela massa estacionária quente e seca.

Palavras-chave: Ilha de calor urbano. Região Metropolitana de São Paulo. Verão. Brisa do mar. Balanço de energia.

ABSTRACT

UMEZAKI, Arissa Sary. **Numerical study of urban heat island characteristics of the Metropolitan Region of Sao Paulo**: the case of 2014. 2020. 131 p. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2020. Corrected version.

The tendency of higher temperature average and the urban expansion trend may exacerbate characteristic problems in the São Paulo Metropolitan Region (MRSP). Among the problems, we highlight the urban heat island (UHI) which may present different behaviors under larger meteorological events. Therefore, the present work aimed to investigate the UHI in the MRSP under the hot and dry air mass that occurred in January 2014, a period marked by higher temperatures and lower precipitation. For this, the Advanced Research mode of Weather Research and Forecasting (WRF) version 3.8.1 atmospheric model was performed to simulate near-surface air temperature and energy balance components. The analysis intended to differentiate a typical UHI intensity pattern, using the average temperature of January months from 2004 to 2013, and to compare it to the atypical UHI, corresponding to January 2014. Results showed that the urban environment thermal response is slower than the rural one, producing a sharp decrease in UHI intensity just after sunrise and a sharp increase at sunset. This caused a minimum UHI in the morning and a maximum UHI at night. The UHI morning behavior was justified by higher thermal admittance and shading effect in the urban environment and by a lower boundary layer height in the rural environment. At night, the main factors to the higher UHI intensity was the greater amount of stored heat release and the obstruction effect caused by buildings prevailing heat loss in the urban environment. Differences in UHI intensity were also observed in response to different atmospheric conditions. Sea breeze appeared to be the phenomenon that most influenced UHI during January. By comparing typical and atypical UHI, no changes in pattern were noted, but larger temperature variations were seen during January 2014. This resulted in an atypical UHI less intense during daytime and more intense during nighttime. Larger temperature variations in January 2014 were explained by lower moisture values seen in the period. Thus, a synergy between the UHI and the atypical hot and dry summer event was identified.

Keywords: Urban heat island. Metropolitan Region of Sao Paulo. Summer. Sea breeze. Energy budget

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGE	Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo
CPTEC-INPE	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
EM-IAG-USP	Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
ENOS	<i>El Niño</i> Oscilação Sul
GFS	<i>Global Forecasting System</i>
GREC-USP	Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo
HR	<i>Hit rate</i>
ICU	Ilha de calor urbana
IOA	<i>Index of agreement</i>
JBN	Jato de Baixos Níveis
MAS	Modo Anular Sul
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SLUCM	<i>Single-layer urban canopy model</i>
VNE	Vórtice do Nordeste
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
km	quilômetro
m	metro
mm	milímetro
W	Watts
h	hora
μm	micrômetro
K	Kelvin
s	segundo
MJ	megajoule
hPa	hectopascal
$^{\circ}$	grau
N	ponto norte
S	ponto sul
E	pontos leste
W	ponto oeste
z_i	altura da camada limite
Q^*	fluxo de radiação líquida
S_{dn}	radiação de onda curta (solar) que chega à superfície
S_{up}	radiação de onda curta refletida pela superfície para a atmosfera
L_{dn}	radiação de onda longa (infravermelha) que chega à superfície
L_{up}	radiação de onda longa emitida pela superfície para a atmosfera
Q_H	fluxo de calor sensível
Q_E	fluxo de calor latente
Q_G	fluxo de calor para o solo
ΔQ_S	energia armazenada na camada do dossel urbano
Q_F	calor antropogênico
ΔQ_A	advecção de calor
T_U	temperatura do ar próximo à superfície no ponto centro
T_R	temperatura do ar próximo à superfície dos pontos considerados rurais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA RMSP	19
3.1.1 Medidas climatológicas da RMSP.....	22
3.1.2 Brisa do mar e brisa terrestre.....	28
3.1.3 Brisas de vale e de montanha.....	31
3.1.4 Frente fria	32
3.2 ILHA DE CALOR URBANA	34
3.2.1 Balanço de radiação na superfície	40
3.2.2 Balanço de energia na superfície.....	43
4 MÉTODOS.....	48
4.1 CONFIGURAÇÕES DO MODELO	48
4.2 SIMULAÇÕES PARA A RMSP	50
4.3 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	51
4.4 ANÁLISE SINÓTICA DE JANEIRO DE 2014	53
4.5 ICU A PARTIR DE DADOS OBSERVACIONAIS	53
4.6 INTENSIDADE DA ICU	54
4.7 BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE	57
4.8 CORTE VERTICAL DA ATMOSFERA	58
5 RESULTADOS	58
5.1 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	59
5.2 CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA EM 2014	62
5.2.1 Temperatura da superfície do mar	64
5.2.2 Frentes no hemisfério sul.....	64
5.2.3 Circulação atmosférica	65
5.3 TEMPERATURA EM 2014	69
5.3.1 Campo de temperatura na RMSP	71
5.3.2 Brisa do mar sobre a RMSP	75
5.4 INTENSIDADE DA ICU PARA A RMSP	78
5.4.1 ICU típica.....	78
5.4.1.1 ICU típica – brisa do mar	79
5.4.1.2 ICU típica – frente fria.....	81
5.4.1.3 Ilha de calor típica – dias sem frentes.....	82
5.4.1.4 ICU típica – total.....	83
5.4.2 Comparação entre a ICU típica e atípica	84

5.4.2.1 Comparação entre ICU típica e atípica – brisa do mar	85
5.4.2.2 Comparação entre ICU típica e atípica – dias sem frentes	86
5.4.2.3 Comparação entre ICU típica e atípica – total	87
5.5 BALANÇO DE ENERGIA	90
5.5.1 Balanço de energia no período diurno	91
5.5.2. Balanço de energia no período noturno	93
5.6 CORTE VERTICAL DA ATMOSFERA NA RMSP	96
6 DISCUSSÃO.....	100
6.1 INTENSIDADE DA ICU TÍPICA.....	100
6.1.1 Balanço de energia - período típico	102
6.1.1.1 Fluxo de calor latente – período típico	103
6.1.1.2 Fluxo de calor sensível – período típico.....	104
6.1.1.3 Calor armazenado – período típico.....	104
6.1.2 Intensidade da ICU típica em diferentes condições atmosféricas	105
6.1.2.1 Brisa do mar – período típico.....	105
6.1.2.2 Frente fria – período típico.....	109
6.1.2.3 Sem frentes – período típico.....	109
6.1.2.4 Total – período típico	110
6.2 INTENSIDADE DA ICU ATÍPICA	110
6.2.1. Balanço de energia - período atípico	111
6.2.1.1 Fluxo de radiação líquida – período atípico	111
6.2.1.2 Fluxo de calor latente – período atípico	112
6.2.1.3 Fluxo de calor sensível – período atípico.....	113
6.2.1.4 Calor armazenado – período atípico.....	113
6.2.2 Intensidade da ICU atípica em diferentes condições atmosféricas	114
6.2.2.1 Brisa do mar – período atípico.....	114
6.2.2.2 Sem frentes – período atípico.....	115
6.2.2.4 Total – período atípico	115
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	116
REFERÊNCIAS	120
APÊNDICE A – TESTES ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	128
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO ESTUDO.....	130

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a urbanização tem sido um processo de transformação, em que, a paisagem natural passa a ser um ambiente homogeneizado pensado para atender exclusivamente a espécie humana (MILLS, 2007).

Seguindo este processo de transformação, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) pode ser compreendida por uma grande mancha urbana altamente urbanizada que abriga cerca de 47,7% da população do estado de São Paulo (IPEA, 2014). A região contém 39 municípios sendo um deles a cidade de São Paulo, megacidade apontada como a quarta maior aglomeração urbana do mundo no ano de 2018 (UN, 2019) e importante polo de trabalho e econômico (IBGE, 2017b).

Apesar de sua taxa de crescimento ter diminuído nos últimos anos, ainda se observam taxas de crescimento demográfico consideráveis em regiões ao redor da cidade de São Paulo, referentes às cidades-dormitório e periferias na RMSP. Estes locais geralmente abrigam a população mais vulnerável, onde a urbanização avança em direção aos seus últimos remanescentes vegetais naturais (RAIMUNDO, 2006).

A alteração da cobertura natural pela típica urbana pode causar mudanças nos padrões de tempo e clima (MILLS, 2007). A geometria do ambiente urbanizado, constituído de construções variadas, é complexa, favorecendo um mecanismo de múltiplas reflexões e emissão de ondas longas e dos raios solares nestes locais (OKE, 1982; ARNFIELD, 2003; MILLS, 2007). O ambiente urbanizado ainda promove alterações no balanço de energia em relação ao ambiente de paisagem natural. O fluxo de calor sensível é maior que o de calor latente em razão da menor quantidade de vegetação presente nas áreas urbanas (BARROS; LOMBARDO, 2016). O solo impermeabilizado faz também com que o fluxo de calor sensível seja maior no ambiente urbano, pois a maior parte da água é removida rapidamente pelo sistema de drenagem, criando um ambiente mais seco (OKE, 1982; MILLS, 2007). Outro efeito causado por áreas urbanizadas é o aumento da rugosidade do solo que pode mudar o padrão de intensidade do vento horizontal e vertical (OKE, 1982; HILDEBRAND; ACKERMAN, 1984; ARNFIELD, 2003; FREITAS; SILVA DIAS, 2005).

Estes diversos fatores contribuem para o surgimento de diferenças de temperatura entre a área urbana e rural, originando uma ilha de calor urbana (ICU) e sua intensidade pode ser definida como a diferença de temperatura entre uma área urbana e não urbana (FERREIRA, OLIVEIRA; SOARES, 2013). A ICU ocasiona um

padrão de circulação atmosférica em que o ar mais quente das áreas urbanizadas ascende e o ar mais frio das regiões rurais ao redor desloca-se em direção ao centro urbanizado (HIDALGO; MASSON; GIMENO, 2010).

Visto isso, a circulação promovida pela ICU pode influenciar na concentração de poluentes nas cidades e seus arredores. Nas áreas urbanas a concentração de partículas poluentes ainda pode causar o efeito de intensificação das ICUs. Alguns tipos de partículas podem aumentar a quantidade de radiação de onda longa nesses locais por absorverem e reemitirem este tipo de radiação. Dessa forma, esforços para o controle de emissões são importantes tanto para a melhora da qualidade do ar quanto para a diminuição na intensidade das ICUs (LI et al., 2018).

É importante esclarecer que a ICU não permanece restrita a fatores locais e pode interagir com fenômenos de média e grande escala. Foi visto que a circulação da ICU na RMSP pode se acoplar à circulação de brisa do mar e contribuir para a ocorrência de episódios de precipitações extremas nas áreas urbanizadas (FREITAS et al., 2007; VEMADO; PEREIRA FILHO, 2016). Estudos ainda mostraram a possibilidade do efeito de sinergia da ICU com episódios de onda de calor, causando a sua intensificação durante o período (FISHER et al., 2007; LI; BOU-ZEID, 2013; WANG et al., 2017; DONG et al, 2018; ZHAO et al., 2018).

Condição semelhante de episódio de onda de calor foi presenciada durante o verão austral de 2014, que resultou em anomalias positivas de temperatura do ar próximo à superfície e anomalias negativas de umidade do ar e precipitação, principalmente no Sudeste do Brasil (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016). Isto ocorreu devido ao estabelecimento de uma massa de ar quente e seca sobre o território brasileiro, impedindo a chegada de frentes frias, além do enfraquecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (RIBEIRO et al., 2015; COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016), sistema mais importante em trazer precipitação para o estado de São Paulo (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016).

Neste ano o mês de janeiro na RMSP apresentou a média mensal mais quente em relação aos meses de janeiro de anos anteriores desde 1933 (IAG-USP, 2014c), além da menor precipitação acumulada quando se considera a série histórica de 1981 a 2015, (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016) e maior valor de irradiação solar global registrado desde 1961 (IAG-USP, 2014b). Diante disso, foi observado que a ICU na RMSP nos meses do verão sob a influência sinótica da massa quente e seca de ar entre 2013 e 2014 sofreu um aumento de intensidade em pelo menos um fator de 2,

se comparada à intensidade vista em uma média de janeiros de dez anos anteriores. Este resultado indicou que houve um efeito sinérgico entre a ICU e o efeito causado pela massa de ar seca e quente na RMSP em 2014 (RIBEIRO et al., 2015).

Visto o efeito de sinergia, é importante destacar o efeito das mudanças climáticas na RMSP, pois estima-se uma elevação de 2°C a 3°C na média de temperatura da região até o fim deste século. Assim, a presente expansão urbana na RMSP associada a efeitos negativos causados pela elevação de temperatura tende a agravar seus problemas característicos de megacidades, aumentando sua vulnerabilidade (NOBRE et al., 2011). Estes efeitos negativos tendem a ser mais acentuados na população de menor renda, principalmente àqueles que residem em locais como favelas, onde o índice de conforto térmico é menor. Isto poderia ser atribuído as construções mal ventiladas e sem isolamento térmico fazendo com que as favelas sejam ambientes favoráveis a acentuação de extremos térmicos (SILVA; RIBEIRO, 2006).

Em razão disso, a investigação da ilha de calor é imperativa para o aumento da qualidade de vida nos ambientes urbanos. Isto deve ser feito por meio da identificação de seus potenciais impactos e desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação, principalmente em áreas tropicais onde essas ações permanecem escassas (OKE, 1982; ARNFIELD, 2003; BARROS; LOMBARDO, 2016). Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi analisar a intensidade da ICU na RMSP sob influência da massa de ar quente e seca atuante em janeiro de 2014. Para isso, o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) foi empregado.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo é verificar em que sentido as características da ilha de calor de janeiro de 2014 diferem das características médias da ilha de calor urbana na RMSP.

Para isso, pretende-se atender os seguintes objetivos específicos:

- (a) analisar as condições sinóticas que causaram as temperaturas elevadas em janeiro de 2014;
- (b) analisar as características médias da ilha de calor, como intensidade, circulação e evolução diurna, em uma média dos meses de janeiro em um período de 10 anos (2004-2013), representando condições típicas para a região, usando simulação numérica e análise de dados observacionais;
- (c) simular a ilha de calor de janeiro de 2014 e analisar suas características com foco na contribuição do balanço de energia da superfície para a intensidade da ilha de calor urbana; e
- (d) determinar as diferenças das características da ilha de calor em 2014 e das condições médias.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção está descrito o referencial teórico do presente estudo. Estão apresentadas as medidas climatológicas e principais sistemas que exercem influência na circulação atmosférica da RMSP. Após isto, estão descritas características da ICU, balanços de radiação e balanço de energia de superfície para a RMSP e demais regiões do globo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA RMSP

A RMSP compreende 39 municípios do estado de São Paulo em uma área de 7.947 km² e abriga uma população de 19.683.975 pessoas, densidade demográfica correspondente a 2.476,82 hab./km² em relação ao ano de 2010. Além disso, a RMSP é um importante polo econômico, responsável por um PIB de R\$ 701,84 bilhões, equivalente a 56,6% do total estadual com base no ano de 2010 (IPEA, 2014).

Em um ambiente 99% urbanizado (IPEA, 2014), a mancha urbana da RMSP estende-se mais de 80 km no sentido leste a oeste e 40 km de norte a sul. Dos seus 39 municípios, 20 possuem áreas urbanas conurbadas quase totalmente impermeabilizadas próximas à bacia do Alto Tietê e seus maiores afluentes, os rios Pinheiros e Tamanduateí (NOBRE et al., 2011). A região ainda apresenta taxas de crescimento demográfico expressivas, principalmente em suas fronteiras, correspondentes às cidades-dormitório e periferias, que avançam em direção aos seus últimos remanescentes vegetais naturais (RAIMUNDO, 2006). As cidades-dormitório e periferias são regiões da RMSP que geralmente abrigam a população mais vulnerável com os menores índices de desenvolvimento humano. Em comparação, os bairros centrais da cidade de São Paulo são os que possuem os maiores índices, onde está concentrada a população de maior renda. Assim, a RMSP é considerada uma região marcadamente desigual (IPEA, 2014). A Figura 1 mostra parte da concentração urbana do estado de São Paulo e a divisão política de seus municípios com as áreas densamente urbanizadas.

Figura 1 – Áreas urbanizadas da concentração urbana de São Paulo

Fonte: IBGE (2017a)

Vista a alta urbanização da RMSP, sua cobertura vegetal existente e entremeada basicamente consiste de fragmentos de vegetação natural secundária correspondentes a Floresta Ombrófila Densa, conhecida como Mata Atlântica, Floresta Ombrófila Densa-Altomontana e Campos Naturais. Estes tipos de vegetação apresentam-se em porções mais preservadas ao extremo sul da Serra da Cantareira, localizada ao norte do município, e em manchas isoladas como as áreas de proteção ambiental. Concentradas em porções menores, há vegetação em áreas urbanizadas, restrita a parques e praças municipais, além de uma escassa arborização viária e espécimes isolados em terrenos particulares (RAIMUNDO, 2006).

Em relação à topografia, como pode ser visto na Figura 2, a RMSP encontra-se a aproximadamente 50 km da costa, em um platô cerca de 700 m acima do nível do mar (RIBEIRO et al., 2018). Este terreno é dominado por elevações variando de 650 a 1200 m acima do nível do mar, sendo delimitado por cadeias de montanhas ao norte pela Serra da Mantiqueira, ao sul pela Serra do Mar e a oeste pelo Pico do Jaraguá (SILVA; LONGO; ANDRADE, 2017). Na Figura 3 ainda é possível observar a topografia da RMSP vista a partir de um perfil vertical sentido sul – norte.

Figura 2 – Topografia da Região Metropolitana de São Paulo

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

A escala de cores representa a altura do terreno em relação ao nível do mar. O eixo x mostra a longitude em graus e o eixo y mostra a latitude em graus

Figura 3 – Topografia do perfil vertical da RMSP sentido sul - norte

Fonte: Ribeiro et al. (2018)

O polígono vermelho representa o uso urbano e suburbano do solo na RMSP. O eixo x representa a latitude em graus e o eixo y representa a altura do terreno em relação ao nível do mar.

3.1.1 Medidas climatológicas da RMSP

O clima na RMSP é típico das regiões subtropicais brasileiras, caracterizado por verões úmidos do mês de dezembro a março. O mês mais quente corresponde a fevereiro com média de temperatura do ar próximo à superfície de 21,8°C e o mais chuvoso é janeiro com 231,9 mm de precipitação acumulada. Isto pode ser visto nas Figuras 4 e 5, que apresentam as médias climatológicas mensais de temperatura e precipitação da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-IAG-USP) considerando o período de medições entre 1933 a 2013 (IAG-USP, 2014b).

Nos meses de verão é também identificada a maior quantidade de irradiação solar global na RMSP, sendo mais expressiva nos meses de dezembro e janeiro, com valores em torno de 600 MJ.m⁻². Isto pode ser visto na Figura 7, que apresenta a média climatológica de irradiação solar global mensal do período entre 1961 a 2014 na EM-IAG-USP (IAG-USP, 2014b).

Em contrapartida, possui invernos secos correspondentes aos meses de junho a agosto, dentre os quais o mês de julho corresponde ao mais frio com média climatológica de temperatura de 15,2°C, que pode ser visualizado na Figura 4. O mês

de menor precipitação é agosto, com precipitação acumulada de 37,5 mm como visto na Figura 5. Agosto também é o mês com menor valor de umidade relativa, como visto na Figura 6, que mostra a média climatológica do período de medições desta variável entre 1957 a 2014 na EM-IAG-USP (IAG-USP, 2014b).

Figura 4 – Média mensal de temperatura do ar próxima à superfície

Fonte: IAG-USP (2014b)

Médias mensais da temperatura do ar próxima à superfície para o ano de 2013 em barras azuis e 2014 em barras vermelhas da Estação Meteorológica IAG-USP. A linha em verde representa a normal de temperatura do ar próxima à superfície mensal considerando o período entre 1933-1960, a linha em lilás representa a normal de temperatura do ar próxima à superfície mensal considerando o período entre 1961-1990, a linha em azul representa a média de temperatura do ar próxima à superfície mensal considerando o período entre 1991-2014 e a linhas em laranja representa a média climática de temperatura do ar próxima à superfície mensal considerando o período entre 1933-2014

Figura 5 – Média de precipitação acumulada mensal

Fonte: IAG-USP (2014b)

Médias mensais da precipitação acumulada para o ano de 2013 em barras azuis e 2014 em barras vermelhas da Estação Meteorológica IAG-USP. A linha em verde representa a normal de precipitação acumulada mensal considerando o período entre 1933-1960, a linha em lilás representa a normal de precipitação acumulada mensal considerando o período entre 1961-1990 e a linhas em laranja representa a média climática de precipitação acumulada mensal considerando o período entre 1933-2014

Figura 6 – Média de umidade relativa mensal

Fonte: IAG-USP (2014b)

Médias mensais da umidade relativa para o ano de 2013 em barras azuis e 2014 em barras vermelhas da Estação Meteorológica IAG-USP. A linha em verde representa a normal de umidade relativa mensal considerando o período entre 1961-1990 e a linha em lilás representa a média umidade relativa mensal considerando o período entre 1957-2014

Figura 7 – Média de irradiação solar global mensal

Fonte: IAG-USP (2014b)

Médias mensais de irradiação solar global para o ano de 2013 em barras azuis e 2014 em barras vermelhas da Estação Meteorológica IAG-USP. A linha em verde representa a normal da radiação solar líquida mensal considerando o período entre 1961-1990 e a linha em lilás representa a média da radiação solar líquida mensal considerando o período entre 1961-2014

Efeitos combinados da posição geográfica, intensidade relativa do semi-estacionário Anticiclone Atlântico Sul e sistemas de baixa pressão continental controlam a variação sazonal dos ventos de superfície RMSP. Assim, induzem ventos de superfície de norte e nordeste durante o verão e de nordeste e leste no inverno. Entretanto, este padrão é frequentemente afetado em razão da brisa do mar, mais frequentemente na primavera e no verão, e sistemas de escala sinótica como frentes frias (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003).

A brisa do mar induz ventos pré-frontais de noroeste e pós-frontais de sudeste durante a sua passagem. Esta é esperada quando condições sinóticas favorecem o rápido aquecimento da superfície terrestre em comparação com a superfície do mar (DIAS; MACHADO, 1997). Em média, a frente de brisa alcança o platô da RMSP em mais de 50% dos dias ao ano sendo predominantes durante os meses quentes (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003). Semelhantemente, as frentes frias também induzem ventos de noroeste pré-frontais e de sudeste pós-frontais caracteristicamente mais persistentes, definindo a direção média do vento na RMSP (DIAS; MACHADO, 1997).

Já em condições de baixa velocidade do vento, efeitos térmicos como a circulação vale-montanha são mais importantes, tendo significado maior nos meses frios. Um outro efeito térmico favorecido em condições de baixa velocidade do vento é a ilha de calor (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003). Esta, por sua vez, mostra indícios de ser predominantemente influenciada pela quantidade de radiação solar líquida na RMSP, que exerce papel importante em sua modulação e intensidade (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2011; AGUIAR et al., 2017). Na Figura 8a é possível observar a velocidade média mensal do vento e a Figura 8b apresenta a média da frequência da direção do vento na EM-IAG-USP.

Figura 8 – Velocidade e direção do vento

Fonte: IAG-USP (2014b)

Em a) estão as médias mensais da velocidade média do vento para o ano de 2013 em barras azuis e 2014 em barras vermelhas da Estação Meteorológica IAG-USP. A linha em verde representa a média de velocidade do vento mensal considerando o período entre 1957-2014. Em b) estão apresentadas as frequências da direção do vento em % dos anos de 2013 em azul e 2014 em vermelho, além da frequência média do vento considerando o período entre 1957-2014 em verde.

3.1.2 Brisa do mar e brisa terrestre

As taxas de aquecimento desiguais da terra e da água causam um tipo de circulação térmica de mesoescala, com ventos vindo do mar em direção ao continente, conhecida como brisa do mar. Durante o dia, devido a propriedades térmicas de seus materiais, ao receber os primeiros raios solares, a costa aquece-se mais rapidamente que o mar, criando uma zona de baixa pressão próxima a superfície da terra e uma zona de alta pressão próxima a superfície do mar. No meio da manhã, após a costa ser aquecida e se tornar mais quente em relação ao mar, a circulação caracterizada como brisa do mar se estabelece, na qual são predominantes ventos vindos do mar em direção ao continente como na Figura 9a. A continuidade no recebimento dos raios solares pode intensificar o gradiente de temperatura e pressão entre continente e mar no começo da tarde (AHRENS, 2009). Dessa forma, em condições favoráveis de diferenças de temperatura entre a costa e o mar, estabilidade da atmosfera e rugosidade do terreno, entre outros, a frente de brisa pode penetrar vários quilômetros continente adentro (MILLER et al., 2003).

De forma oposta, à noite com o cessamento dos raios solares, a costa resfria-se mais rapidamente que o mar. Forma-se uma zona de alta pressão sobre a terra e uma zona de baixa pressão sobre a água, dando origem a ventos da costa em direção ao mar, caracterizando a brisa terrestre ilustrada na Figura 9b (AHRENS, 2009).

Grandes diferenças de temperatura do ar sobre a terra e água são comuns em regiões tropicais durante todo o ano (AHRENS, 2009). Assim, ainda que a brisa do mar se faça presente nos meses de inverno, ela possui atuação mais forte no verão na RMSP em razão do contraste de temperatura entre a costa e o oceano ser maior (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003).

Em estudo observacional na cidade de São Paulo, a atuação da brisa do mar pôde ser notada pela mudança de velocidade e direção do vento próximo à superfície. No início do período da tarde observou-se uma leve queda na velocidade do vento devido ao efeito causado pela combinação do vento de brisa de sudeste e um fraco vento predominante de nordeste. O vento de sudeste torna-se predominante, com um acentuado aumento de velocidade seguido de uma queda de velocidade acentuada nas horas seguintes do período da tarde, marcando a passagem da brisa do mar (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003).

Além da mudança no padrão do vento, a frente de brisa desloca-se continente adentro causando uma rápida queda na temperatura do ar próximo à superfície por onde passa (AHRENS, 2009). Este comportamento foi visto na RMSP em estudo numérico, que mostrou que a brisa do mar foi responsável por causar queda na temperatura do ar próxima à superfície e um aumento da umidade do ar da região no período da tarde (RIBEIRO et al., 2018).

Quando há um contraste marcante de temperatura do ar sobre a costa em relação à frente de brisa, o ar mais quente e menos denso já presente sobre a costa converge com o ar mais frio da frente de brisa e ascende. Se o ar ascendente for suficientemente úmido, uma linha de nuvens cumulus pode se formar ao longo da frente de brisa e, caso as condições atmosféricas estejam instáveis, poderá ocorrer formação de tempestades (AHRENS, 2009). O efeito da relação da brisa do mar com a formação de tempestades já foi estudado por meio de simulações numéricas na RMSP. Foi visto que a circulação causada pela brisa do mar em combinação com a ICU na área urbanizada, em condições atmosféricas favoráveis, tem potencial para gerar tempestades na região (FREITAS, et al., 2007; VEMADO; PEREIRA FILHO, 2016).

Figura 9 – Desenvolvimento da brisa do mar e brisa terrestre
(a)

(b)

Fonte: Ahrens (2009)

Perfil mostrando a circulação do ar, no qual: a) representa a brisa do mar soprando da água em direção a terra, enquanto em b) a brisa terrestre sopra da terra para a água. A letra "A" representa alta pressão e a letra "B" representa baixa pressão.

3.1.3 Brisas de vale e de montanha

A brisa de vale e a brisa de montanha são padrões de circulação do ar desenvolvidos ao longo de encostas, gerados pelo aquecimento solar das mesmas. Isto faz com que haja diferentes padrões de vento entre o período diurno e período noturno.

Durante o dia, os raios solares aquecem as paredes dos vales que, por sua vez, aquecem o ar em contato com as suas superfícies tornando-o menos denso. Dessa forma, cria-se um contraste no qual o ar é aquecido e se torna menos denso que o ar acima do vale de mesma altitude. O ar mais quente próximo à superfície da encosta ascende criando uma circulação de ventos fracos em direção ao seu topo, chamada de brisa de vale, como na Figura 10a (AHRENS, 2009).

À noite, o padrão de circulação se inverte. Com a ausência dos raios solares, as superfícies das encostas esfriam rapidamente, causando também o esfriamento do ar que está em contato com elas. O ar próximo à superfície das encostas torna-se, portanto, mais denso em relação ao ar presente na mesma altitude, gerando um padrão de circulação em que o ar mais próximo a encosta descende em direção à sua base. Este fenômeno é conhecido como brisa de montanha, representado na Figura 10b (AHRENS, 2009).

Os movimentos de ventos ascendentes começam de manhã cedo, atingem sua intensidade máxima ao meio dia e invertem sua direção no começo da noite. Já os ventos descendentes atingem sua maior intensidade nas primeiras horas da manhã, geralmente antes do nascer do sol. As condições favoráveis para a circulação de brisas de vale e montanha ocorrem em dias de céu limpo, quando os ventos de maior escala são fracos.

Em estudo na RMSP efeitos da topografia na circulação do ar também não se mostraram óbvios, pois ventos de larga escala e a circulação da brisa do mar predominam sobre os ventos de causa topográficas, que ficam mascarados. Contudo, no período noturno dos meses mais frios, foi possível identificar uma brisa de montanha em sentido descendente convergindo sobre a cidade, enquanto no período diurno dos meses de verão foram vistos ventos de vale ascendentes divergindo sobre a cidade (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003).

Além disso, foi visto que a circulação causada pela topografia da RMSP pode se combinar com a circulação de brisa do mar. A escarpa da Serra do Mar durante o

período diurno induz uma circulação de vale que se combina com a brisa do mar em um movimento ascendente, impulsionando sua chegada ao platô onde está situada a RMSP (RIBEIRO et al., 2018).

Figura 10 – Brisa de vale e de montanha

(a)

(b)

Fonte: Ahrens (2009)

Na figura a) representa a brisa de vale soprando em direção ao topo da encosta durante o dia e b) representa a brisa de montanha soprando em direção à base da encosta durante a noite. “B” e “A” representam baixa e alta pressão respectivamente, enquanto as linhas em roxo representam superfícies em pressão constante.

3.1.4 Frente fria

As frentes frias são representações de zonas em que o ar polar frio, seco e estável substitui o ar de característica subtropical mais quente, úmido e instável (AHRENS, 2009). Os critérios para definir a aproximação de uma frente fria em um mapa de superfície, segundo Ahrens (2009), são:

- (a) mudanças bruscas de temperatura em um curto espaço de tempo;
- (b) mudanças na umidade do ar;
- (c) alterações na direção do vento;
- (d) mudança de pressão; e
- (e) padrões de formação de nuvens e precipitação.

Mudanças bruscas de pressão são significativas para localizar a posição da frente fria, pois, um pouco antes de sua chegada, a pressão tende a cair e, logo após a sua passagem, a pressão tende a aumentar. A uma distância considerável da frente a tendência é aumentar constantemente (AHRENS, 2009).

Como pode ser visto na Figura 11, durante a sua passagem, o ar mais frio e denso da frente fria força o ar mais quente, úmido e condicionalmente instável a

ascender, se condensando em uma série de nuvens cumuliformes em uma faixa relativamente estreita. Isto dá origem a fortes chuvas e rajadas de vento mais concentradas onde a frente está localizada, enquanto o ar é resfriado rapidamente mais atrás da área em que passou (AHRENS, 2009).

À medida que a diferença de temperatura através da frente fria diminui, frequentemente, ocorre o seu enfraquecimento e após isso sua dissipação, condição conhecida como frontólise. Porém, a situação oposta pode ocorrer com aumento do contraste de temperatura através da frente, causando seu fortalecimento e regeneração de forma mais vigorosa, situação chamada de frontogênese (AHRENS, 2009).

Figura 11 – Vista vertical do tempo através de uma frente fria

Fonte: Ahrens (2009)

A temperatura do ar está representada em graus Fahrenheit. Representação dos tipos de nuvens: (1) Cs representa cirrostratus; (2) Ci representa cirrus; (3) Cb representa cumulonimbus; e (4) Ac representa altocumulus.

Para a RMSP, uma média de 3 frentes frias chegam à região por mês, com maior frequência na primavera e menor no verão (MORAIS; CASTRO; TUNDISI, 2010) como pode ser visto na Figura 12.

Nos dias anteriores à passagem da frente fria na RSMP, o vento de norte é visto como predominante. Durante a passagem ocorre a virada do vento, que passa a ser de sudeste, induzida pelo sistema pós-frontal. O predomínio do vento de sudeste prevalece por até dois dias após a passagem da frente fria, que depois deste período começa a se dispersar (MORAIS; CASTRO; TUNDISI, 2010).

Figura 12 –Regime mensal de frentes frias na RSMP

Fonte: Morais, Castro e Tundisi (2010)

3.2 ILHA DE CALOR URBANA

Áreas urbanas são cobertas por grandes porcentagens de asfalto e concreto, que, por sua vez, são superfícies impermeáveis, com albedos e capacidades térmicas que convertem uma maior quantidade de radiação solar em calor sensível em comparação às áreas rurais, além de estocar mais energia. Além disso, muitas cidades atuam como fontes antropogênicas de calor. Isto faz com que o ar próximo à superfície geralmente apresente temperaturas maiores em áreas urbanas do que em suas redondezas menos urbanizadas, gerando o efeito da ICU, Figura 13a (STULL, 2009).

O termo “ilha de calor” tem origem no desenho formado quando isoterma são plotadas em um mapa meteorológico de superfície, no qual o padrão formado de forma idealizada assemelha-se a contornos topográficos de uma ilha (STULL, 2009), como pode ser visto na Figura 13b.

Figura 13 – Representação de uma ilha de calor hipotética

Fonte: Oke (1982)

Representação espacial e temporal hipotética das características de dossel da ilha de calor em condições de ventos calmos e céu limpo em uma cidade de latitude média. Em a) é apresentado um perfil de temperatura através da seção AB de uma cidade e em b) a cidade é apresentada em um plano. As áreas em cinza correspondem a área construída.

É preciso esclarecer que o padrão de distribuição de temperatura de uma ICU mais intensa localizada no centro mais urbanizado da cidade nem sempre pode ser considerado como uma representação da realidade (HIDALGO; MASSON; GIMENO, 2010). As cidades possuem características diferentes, pois variam em relação ao grau de urbanização, materiais utilizados nas construções, geometria, além de características meteorológicas e de topografia locais. Logo, as ICUs das cidades apresentam características variadas, porque os fatores que influenciam no seu surgimento são variados (OKE, 1982). Assim, a existência da ICU em uma cidade pode ser atribuída a várias possíveis causas em maior ou menor grau.

O Quadro 1 apresenta de forma resumida algumas causas comuns para a formação de uma ICU.

Quadro 1 – Causas comumente hipotetizadas da ilha de calor urbana

Termos do balanço de energia alterados levando a uma anomalia térmica	Características da urbanização responsáveis por mudanças no balanço de energia
1 Aumento de absorção de radiação de onda curta	Geometria do cânion – aumento de área de superfície e múltiplas reflexões
2 Aumento de radiação de onda longa vinda do céu	Poluição do ar – maior absorção e re-emissão
3 Diminuição da perda de radiação de onda longa	Geometria do cânion – redução da porção visível do céu
4 Fonte de calor antropogênico	Liberação de calor de construções e do tráfego de veículos
5 Aumento do armazenamento de calor sensível	Materiais de construção – admitância térmica aumentada
6 Diminuição de evapotranspiração	Materiais de construção – aumento de superfícies impermeáveis
7 Diminuição do transporte turbulento total de calor	Geometria do cânion – redução da velocidade do vento

Fonte: Oke (2009) (após Oke, 1982)

De forma geral, em estudos nas cidades de clima temperado durante o verão, foi visto que o comportamento diurno da ICU é determinado por diferenças de aquecimento e resfriamento entre superfícies urbanas e rurais. Este efeito fica mais acentuado principalmente no período noturno, próximo ao horário do pôr do sol. Neste período, observa-se um aumento acentuado na intensidade da ICU por algumas horas, pois o ambiente rural resfria mais rápido que o ambiente urbano (OKE, 1982; ARNFIELD, 2003).

Na RMSP o comportamento diurno da ICU apresentou-se semelhante aos de países de clima temperado, com maior intensidade durante o período noturno (RIBEIRO et al., 2015). Porém, foi observado também um pico na intensidade da ICU durante o período da tarde, indicando a influência da passagem da brisa do mar, que faz a temperatura cair por onde passa. Esta influência é visível principalmente em relação à região sul da RMSP, que é mais frequentemente atingida por essa circulação, além de receber essa circulação mais cedo no dia, apresentando um maior resfriamento e criando grandes contrastes de temperatura em relação à área central urbanizada mais quente (FERREIRA et al., 2012; FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013; RIBEIRO et al., 2015; RIBEIRO et al., 2018).

Uma outra característica da ICU em cidades de clima temperado é sua variação sazonal, influenciada pela quantidade de calor antropogênico produzido nos meses de baixas temperaturas. Nessas cidades, a ICU é governada principalmente pelo aquecimento solar no verão, enquanto no inverno é particularmente governada pelo calor antropogênico, em razão da necessidade do uso de sistemas de aquecimento

(OKE, 1982). Em um estudo na região metropolitana de Tóquio, por exemplo, observou-se que o fluxo de calor antropogênico foi correspondente a cerca de 200 W.m^{-2} durante o verão e que este valor dobra no inverno (ICHINOSE; SHIMODOZONO; HANAKI, 1999).

Diferenças sazonais na quantidade de fluxo de calor antropogênico não se mostraram muito expressivas para a RMSP como no caso de países em altas latitudes, pois o calor antropogênico calculado nos meses de inverno mostrou-se somente 2% maior que nos meses de verão na RMSP. Isto poderia ser explicado pelo fato do inverno no Brasil não ser tão rigoroso quanto o dos países de latitudes mais altas. Além disso, a matriz energética brasileira para a produção de eletricidade é majoritariamente constituída por hidrelétricas (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2011).

A Figura 14 mostra a evolução diurna do fluxo de calor antropogênico para a cidade de São Paulo, que foi considerada representativa para retratar o fluxo de calor antropogênico da RMSP no presente estudo. A partir desta observa-se a maior contribuição de fluxo de calor antropogênico de fonte veicular, contribuindo com cerca de 50% do total, seguida pelas fontes estacionárias com 41% e o metabolismo humano, que contribui com 9% do total do fluxo de calor antropogênico. Foram vistos três picos diários no fluxo de calor antropogênico, influenciados pelas fontes veiculares. Isto é atribuído ao maior tráfego de veículos no começo da manhã e final da tarde e o encerramento do horário do rodízio na cidade de São Paulo no final da manhã (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2011).

Figura 14 – Evolução diurna do fluxo de calor antropogênico na cidade de São Paulo

Fonte: Ferreira, Oliveira e Soares (2011)

Gráfico com a evolução diurna do fluxo de calor antropogênico (Q_F) em agosto de 2007 na cidade de São Paulo associado a: (a) fontes veiculares, linha tracejada e pontilhada; (b) fontes estacionárias, linha tracejada; (c) metabolismo humano, linha pontilhada e; (d) total, linha contínua. No eixo x está a hora local e o eixo y está o fluxo de calor antropogênico em $W.m^{-2}$.

Um dos efeitos da ICU é a alteração da circulação do ar, que acaba por influenciar a altura da camada limite sobre as áreas mais urbanizadas das cidades. A camada limite ou camada limite planetária pode ser definida como a parte da troposfera que sofre influência direta da superfície terrestre e responde às suas forçantes em um período menor ou igual a 1 h. As forçantes variam em função da transferência de calor, evaporação, modificações do vento causadas pela rugosidade do terreno, entre outras. Em razão disto, a altura da camada limite varia de poucos metros a quilômetros, dependendo da intensidade da turbulência do ar. Pode-se ainda dividir a camada limite planetária em outras camadas de características distintas, como a camada limite superficial, a camada de mistura e a camada de entranhamento. Em uma escala ainda menor, podemos delimitar, dentro da camada limite superficial, uma camada onde estão presentes os elementos da superfície, chamada de camada de dossel. No caso de um ambiente urbanizado, ela é chamada de camada de dossel urbano. Esta é definida como uma porção da camada limite superficial entre o topo das construções e o solo (STULL, 2009).

Distinções entre características superficiais das áreas urbana e rural criam diferenças de temperatura entre estes ambientes. A partir disso, um gradiente de pressão horizontal é formado. O ar mais quente ascende sobre a cidade e o ar mais frio das regiões rurais ao redor se desloca em direção à região urbanizada dando início

a uma circulação local, a circulação da ICU. Assim, uma convergência é formada em baixos níveis e uma divergência é originada logo acima. Essa circulação contribui para que a altura da camada limite sobre a região urbanizada permaneça mais alta em relação às áreas suburbanas e rurais, por causa do maior fluxo de ar ascendente (HIDALGO; MASSON; GIMENO, 2010), como na Figura 15.

Figura 15 – Esquema de seção vertical da camada limite urbana

Fonte: Hidalgo, Masson e Gimeno (2010)

A altura da camada limite urbana está representada por z_i . ICU corresponde à ilha de calor urbana.

Em locais de latitude média, há estudos que apontaram que a presença das cidades tem sido relacionada à ocorrência de eventos de precipitação mais fortes, causados pelo movimento de ar ascendente em locais urbanizados. O movimento ascendente da circulação da ICU possibilita o transporte de maior quantidade de umidade a maiores alturas e a formação de nuvens de tempestades. Foi visto que geralmente a precipitação mais forte ocorre não exatamente no centro mais urbanizado das cidades, mas em locais próximos, de acordo com o sentido do vento (OKE, 2009).

Na RMSP, estudos também apontaram que a circulação da ICU pode causar eventos de precipitação mais forte no local. Isto seria causado pela interação da frente de brisa do mar, trazendo umidade para a região, com a circulação da ICU que contribui para a formação de tempestades (FREITAS, et al., 2007; VEMADO; PEREIRA FILHO, 2016; RIBEIRO et al., 2018).

Outros efeitos causados pela substituição dos materiais da paisagem natural pelos da paisagem urbana são alterações no balanço de radiação e de energia na área urbana, que por sua vez também contribuem para o aparecimento das ICUs, pois

a superfície urbana é caracterizada principalmente por converter grande parte da energia radiante que recebe em calor sensível, contribuindo para que sua temperatura seja maior em relação às áreas rurais (OKE, 1982). A seguir o papel dos balanços de radiação e de energia na ICU serão mais detalhadamente descritos.

3.2.1 Balanço de radiação na superfície

A radiação que incide sobre uma substância pode ser absorvida, refletida por sua superfície ou transmitida através desta. Além disso, a radiação que é absorvida pode ser emitida em outro comprimento de onda. Em termos de classificação de comprimentos de ondas, cientistas designaram de radiação de onda curta a radiação de comprimento entre 0,15 a 3,0 μm , que corresponde à radiação solar, e radiação de onda longa entre 3,0 a 100 μm (OKE, 2009).

A intensidade de radiação solar de onda curta que chega no topo da atmosfera é chamada de constante solar, variando entre 1360 a 1380 W.m^{-2} (STULL, 2009). Em um ambiente natural idealizado, de toda a radiação solar que chega ao topo da atmosfera cerca de 30% é refletida e espalhada de volta para o espaço pelas nuvens, superfície e atmosfera. Enquanto isso, cerca de 19% da radiação solar é absorvida pela própria atmosfera e nuvens e os 51% restantes em forma de radiação direta ou indireta são absorvidos pela superfície, como visto na Figura 16 (AHRENS, 2009). Dessa forma, parte da radiação de onda curta é atenuada por espalhamento, absorção e reflexão causada por nuvens no caminho até chegar à superfície (STULL, 2009).

Figura 16 – Balanço de radiação

Fonte: AHRENS (2009)

As proporções de radiação de onda curta e onda longa que se deslocam da atmosfera para a superfície ou da superfície para a atmosfera compõem o balanço de radiação do local. Estas proporções dependem das características dos componentes que constituem o ambiente, principalmente em relação à sua cobertura de superfície e à umidade do ar (OKE, 2009). A diferença entre a radiação que chega da atmosfera à superfície e a radiação que se desloca da superfície para a atmosfera é chamada de radiação líquida.

Devido ao ambiente urbanizado, as cidades têm grande impacto nas componentes de onda curta e longa na radiação líquida. Isto ocorre principalmente em razão da presença de poluentes do ar, que reagem com os raios solares, e mudanças nas propriedades radiativas da superfície (OKE, 1982).

Para calcular o balanço de radiação em uma superfície, dividem-se os termos da radiação líquida Q^* em quatro componentes, como na Equação 1 (STULL, 2009):

$$Q^* = S_{dn} - S_{up} + L_{dn} - L_{up} \quad (1)$$

onde

S_{dn} = radiação de onda curta (solar) que chega à superfície

S_{up} = radiação de onda curta refletida pela superfície para a atmosfera

L_{dn} = radiação de onda longa (infravermelha) que chega à superfície

L_{up} = radiação de onda longa emitida pela superfície para a atmosfera

Para definir uma convenção, neste trabalho os fluxos em sentido da atmosfera para a superfície são considerados negativos e os fluxos da superfície para a atmosfera são positivos. Assim, cada um dos termos representa a soma dos componentes da radiação direta ou difusa atravessando um plano horizontal local como a superfície (STULL, 2009).

Em relação à RMSPP, observou-se que em termos gerais a radiação líquida é ligeiramente diferente em uma superfície característica de ambiente urbano em comparação com a de um ambiente rural. Porém, as diferenças entre superfícies distintas foram consideravelmente maiores quando se trata das componentes de radiação. Isto ocorre devido a diferenças de emissividade, albedo, propriedades térmicas do substrato da superfície, além de diferenças na transmissividade e emissividade da atmosfera (FERREIRA, et al., 2012).

A Figura 17 mostra a evolução diurna das componentes do balanço de radiação na cidade de São Paulo durante o mês de fevereiro, padrão que pode ser considerado como representativo para o verão na RSMP. Assim, foi possível observar que durante o dia a radiação líquida é dominada pelos componentes de radiação de onda curta. À noite, com a ausência dos raios solares, tornou-se mais evidente o papel do balanço de energia no balanço de radiação do ambiente, pois o balanço de radiação líquida durante a noite mostrou-se influenciado principalmente pela quantidade de umidade na superfície (FERREIRA, et al., 2012). Na subseção a seguir está descrito o balanço de energia na superfície.

Figura 17 – Evolução diurna dos componentes do balanço de radiação na superfície da cidade de São Paulo durante fevereiro de 2004

Fonte: Ferreira et al. (2012)

Erros estatísticos estão indicados pelas barras verticais. Onde: S_{dn} é a radiação de onda curta em direção à superfície, S_{up} é a radiação de onda curta em direção à atmosfera, L_{dn} é a radiação de onda longa em direção à superfície e L_{up} é a radiação de onda longa em direção à atmosfera.

3.2.2 Balanço de energia na superfície

Utilizando o exemplo de uma região urbana, define-se uma camada de ar com o seu topo logo acima das árvores e edifícios e sua base imediatamente abaixo da superfície terrestre, representada na Figura 18. Essa, que é a camada de dossel urbano, será considerada a interface entre a atmosfera e a superfície para o balanço de energia. É possível observar a ocorrência de diferentes tipos de transferência de energia dessa camada para o solo e para a atmosfera: por meio de turbulência com o ar que se encontra acima, transferência radiativa através do seu topo e base e transferência de energia molecular para ou do solo (STULL, 2009).

A partir disto, em termos simples, o balanço de energia pode ser definido como a proporção de energia que entra, sai ou é armazenada em uma camada de ar na superfície, na qual, a radiação de onda curta é a forçante externa e os demais termos reagem em resposta (STULL, 2009). Assim, o balanço de energia durante o dia pode ser visto principalmente como uma resposta à radiação líquida. No balanço de energia, a radiação líquida, Q^* , é contrabalançada por uma combinação de trocas de calor convectivas entre a atmosfera e a superfície por meio de calor sensível, Q_H , e calor latente, Q_E , além de ser feita também por condução da atmosfera para o solo, Q_G , e vice-versa (OKE, 2009).

Figura 18 – Contribuições para o balanço de energia na superfície

Fonte: Stull (2009)

Q^* é a contribuição radiativa líquida, Q_H é o fluxo turbulento de calor sensível, Q_E é o fluxo turbulento de calor latente, Q_G é o fluxo molecular para o solo, e ΔQ_s é o armazenamento.

No presente estudo ainda é importante esclarecer que todo fluxo de energia vindo da superfície para a atmosfera será representado como positivo enquanto o oposto, no qual o fluxo vem da atmosfera para a superfície, será representado como negativo. Os fluxos do solo para a superfície serão também representados como positivos e da superfície para o solo como negativos. Já a variação de calor armazenado é positiva quando essa energia aumenta no dossel e negativa quando diminui.

Dito isto, é possível notar que o balanço de energia se diferencia entre o período diurno e noturno. Durante o período diurno, em um cenário típico de dia ensolarado em uma superfície continental, no final da manhã, Q^* encontra-se com sinal negativo em razão da maior quantidade de radiação solar indo em direção à superfície. Neste horário a radiação líquida adentra a atmosfera em direção à superfície. Os termos Q_H e Q_E encontram-se positivos devido ao calor e umidade transferidos da superfície para a atmosfera. O termo Q_G é negativo, pois o calor da superfície, aquecida pela radiação solar, é conduzido em direção ao solo, como na Figura 19a.

Já durante a noite, Q^* geralmente permanece positivo por causa da transferência de calor por meio de radiação de onda longa para o espaço. O termo Q_H

torna-se negativo porque a superfície esfria mais rapidamente que a atmosfera e Q_E é negativo também pela formação de orvalho e geada. Por fim, a condução de calor vindo do solo quente para a superfície faz com que Q_G torne-se positivo, como na Figura 19b. (STULL, 2009).

Figura 19 – Variação típica dos termos do balanço de energia na superfície

Fonte: Stull (2009)

Variação típica dos termos do balanço de energia na superfície para (a) durante o dia sobre o continente e (b) durante a noite sobre o continente.

Assim, o balanço de energia para esta camada é representado pela Equação 2 (STULL, 2009):

$$-Q^* = Q_H + Q_E - Q_G + \Delta Q_S \quad (2)$$

onde

Q^* = radiação líquida

Q_H = representa o fluxo de calor sensível

Q_E = representa o fluxo de calor latente

Q_G = representa o fluxo de calor para o solo

ΔQ_S = denota a variação de energia armazenada na camada do dossel urbano

É importante ressaltar que a troca de calor entre a superfície e o ar é dependente de vários fatores, como a natureza da superfície, nível de estabilidade da atmosfera e propriedades térmicas do solo. Além disso, a quantidade de umidade disponível na superfície influencia fortemente a distribuição de transporte de calor entre as formas de calor sensível e latente (OKE, 1982).

Em um ambiente urbanizado isto é relevante, pois há uma infinidade de tipos de superfícies, de forma que cada superfície tenha uma combinação única de propriedades radiativas, térmicas, de umidade, entre outras. Estas diferentes propriedades contribuem para que o resto do ambiente ao redor sofra modificações com infinitudes de arranjos de balanço de energia, microclimas característicos de áreas urbanas (OKE, 1982).

Dessa forma, Oke (2009) propõe uma equação para o balanço de energia sobre uma superfície urbana, que considera um volume do dossel urbano com extensão vertical suficiente para desprezar o fluxo de calor para o solo (Q_G). Esse balanço é representado pela Equação 3:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_A + \Delta Q_S \quad (3)$$

Onde ΔQ_A é o termo de advecção de calor e Q_F é o calor antropogênico, que são normalmente desprezados. O termo de armazenamento de calor (ΔQ_S) inclui o armazenamento nas edificações, no solo e no ar do dossel urbano e pode ser calculado pelo método do resíduo, como também fizeram Ferreira et al. (2013), conforme a Equação 4:

$$\Delta Q_S = Q^* - Q_H - Q_E \quad (4)$$

A grande porção de área impermeabilizada faz com que a região urbana seja mais seca e haja muito mais fluxo de calor sensível. Além disso, a geometria em que as construções e ruas estão dispostas pode causar modificações na distribuição espacial da radiação solar e precipitação, favorece o aumento da interação radiativa entre superfícies construídas, influencia a perda de radiação de onda longa para o espaço, interfere no vento local, entre outros. O resultado é que um ambiente construído com materiais com propriedades térmicas, radiativas, de umidade e aerodinâmica relativamente uniformes pode apresentar regimes dos componentes do balanço de radiação e de energia espacialmente e temporalmente complexos (OKE, 1982).

No ambiente urbanizado é comum que o calor armazenado seja bem maior que as áreas ao redor, devido à maior condutividade térmica e capacidade térmica de seus materiais (OKE, 1982). Para isso utiliza-se o parâmetro que combina estas duas

propriedades, a admitância térmica, sendo equivalente ao quadrado do produto da condutividade térmica pela capacidade térmica (OKE, 2009). A partir desta é possível mensurar a resposta de uma superfície a um dado fluxo de calor. As superfícies com maiores valores de admitância térmica, como a de cidades, tendem a aceitar ou liberar facilmente o calor armazenado e registram menores taxas de mudanças de temperatura (OKE, 1982). Portanto, a admitância térmica mede a facilidade com a qual uma superfície armazena ou libera calor (OKE, 2009).

O balanço de energia em relação à RMSP pode ser visto na Figura 20 que mostra o balanço para a cidade de São Paulo em local urbanizado no período de estação seca, sendo portanto considerada representativa para a região do presente estudo. É importante informar que na Figura 20 o sinal da radiação líquida é o oposto do usado no presente estudo: a radiação líquida é positiva quando vem da atmosfera para a superfície e negativa no sentido contrário.

Por meio disto, observou-se que a maior parte do fluxo de energia disponível durante o dia na superfície foi transferida para o dossel urbano, em forma de calor armazenado. Uma parcela menor foi transferida para a atmosfera de forma turbulenta, em forma de calor sensível e de calor latente (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013).

Figura 20 – Evolução diurna dos principais componentes do balanço de energia da superfície na cidade de São Paulo

Fonte: Ferreira, Oliveira e Soares (2013)

Valores de médias horárias baseadas em observações obtidas durante 18/05 a 17/06 do ano de 2009 em local urbano na cidade de São Paulo. Q^* é o fluxo de radiação líquida, Q_H é o fluxo de calor sensível, Q_E é o fluxo de calor latente e ΔQ_S é o fluxo de energia armazenada. As barras na vertical indicam o erro estatístico.

4 MÉTODOS

Nesta seção está descrita a metodologia empregada no presente estudo. Na primeira subseção estão apresentadas as configurações utilizadas para realizar as simulações com o modelo. Em seguida, encontram-se explicações sobre as simulações realizadas para reproduzir as condições meteorológicas da RMSP.

Nas subseções seguintes estão explanados os procedimentos adotados para a geração dos resultados do presente estudo. Encontram-se explicações sobre a etapa de validação das simulações do modelo, informações sobre a construção da caracterização das condições atmosféricas de escala sinótica em 2014, apresentação de como se deu a análise da ICU da RMSP a partir de dados observacionais, apresentação das etapas da metodologia empregada para produzir os resultados sobre o comportamento da ICU e balanço de energia na superfície da RMSP, respectivamente, e, por fim, a construção da análise da circulação atmosférica na RMSP.

4.1 CONFIGURAÇÕES DO MODELO

No presente estudo o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), com o núcleo de pesquisa *Advanced Research*, versão 3.8.1, foi empregado a fim de se realizarem simulações atmosféricas para a RMSP (SKAMAROCK et al. 2008). Nas simulações foi utilizado o *Single-Layer Urban Canopy Model* (SLUCM) em conjunto com o modelo WRF para tratar a superfície urbana e sua interação com a atmosfera. A partir desta combinação, a área urbana pôde ser categorizada em três diferentes classes: (a) residencial pouco densa, (b) residencial densa e (c) comercial/industrial. Estas classes urbanas são definidas por diferentes frações urbanas, que podem ser entendidas como a proporção da paisagem urbana sem cobertura de vegetação natural. Assim, a classe residencial pouco densa possui fração urbana de 50%, a residencial densa de 90% e a comercial/industrial de 95% (CHEN et al. 2011).

Foram usadas as seguintes parametrizações: (a) esquema de tratamento da camada limite da *Yonsei University*; (b) dados meteorológicos, de superfície iniciais e de fronteira da reanálise do ERA-Interim; (c) topografia do satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (JARVIS et al., 2008) com 3 arco-segundos de resolução; (d) esquema de tratamento da superfície da *Noah* com 4 camadas de solo; e (e)

temperatura da superfície do mar atualizada a cada 6 horas com dados de reanálise do ERA-Interim. Os dados de entrada do modelo para a classificação do tipo de uso do solo no domínio interior podem ser vistos na Figura 21.

Figura 21 – Tipos de uso e ocupação do solo na RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

As diferentes cores representam os tipos de uso do solo na RMSP correspondentes a legenda ao lado. O eixo x mostra a longitude em graus e o eixo y mostra a latitude em graus.

A fim de simular as condições atmosféricas da RMSP foram usadas 3 grades aninhadas sobre a região: a exterior com espaçamento horizontal de 9 km e 60 x 60 pontos de grade, a intermediária com espaçamento horizontal de 3 km e 79 x 61 pontos de grade e a interna com resolução horizontal de 1 km e 109 x 67 pontos de grade. Já o espaçamento vertical empregado possui 38 níveis irregularmente espaçados com menor espaçamento próximo à superfície. Os domínios empregados neste estudo para realizar as simulações para a RMSP pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Topografia com os domínios da área investigada

Fonte: Ribeiro et al. (2018)

O retângulo branco representa o domínio intermediário e o retângulo amarelo representa o domínio interno. A linha tracejada em branco marca o local do corte norte – sul do perfil vertical utilizado na análise.

4.2 SIMULAÇÕES PARA A RMSP

Por meio das configurações apresentadas no subitem anterior, o modelo simulou dados de temperatura do ar próximo à superfície, correspondente a 2 m acima do solo, e das componentes do balanço de energia na superfície. As simulações foram realizadas separadas em dois períodos: (a) meses de janeiro dos anos compreendidos entre 2004 a 2013 e (b) mês de janeiro do ano de 2014.

Os dados de temperatura do ar próximo à superfície e das componentes do balanço de energia foram analisados para cinco pontos da RMSP, todos dentro do domínio interno nas simulações. Quatro pontos foram situados em regiões cercadas por vegetação e considerados como representativos de áreas rurais. Assim, os pontos

rurais foram: ponto norte (N) -23.3387° , -046.5044° ; ponto sul (S) -23.8101° , -046.4283° ; ponto leste (E) -23.5616° , -046.0395° e; ponto oeste (W) -23.643° , -046.9511° . O quinto ponto foi estabelecido no centro da cidade de São Paulo sendo considerado como área urbana, aqui chamado de ponto centro (C) -23.5334° , -046.6169° . Os pontos localizados em diferentes pontos cardeais foram escolhidos na tentativa de melhor captar fenômenos atmosféricos de forma espacialmente distribuída. A Figura 23 indica a localização dos pontos escolhidos na RMSP.

Figura 23 – Localização dos pontos utilizados no estudo na RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

As áreas cinzentas representam as áreas urbanizadas da RMSP e as áreas em verde correspondem a parte vegetada da região.

4.3 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A fim de validar as simulações produzidas pelo modelo WRF, dados simulados de temperatura do ar próximo à superfície, umidade relativa e velocidade do vento foram comparados aos dados observacionais de diferentes estações meteorológicas de superfície localizadas na RMSP. A comparação foi feita através dos testes estatísticos de: (a) correlação linear; (b) erro médio quadrático; (c) raiz quadrada do erro médio quadrático; (d) erro sistemático, ou *bias*; (e) índice de concordância, ou *index of agreement*; e (f) taxa de acerto, ou *hit rate*. Explicações sobre os testes utilizados encontram-se no Apêndice A.

Dessa forma, foram feitas simulações para gerar dados de temperatura do ar próximo à superfície para as estações meteorológicas pertencentes a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) de Capão Redondo, Carapicuíba, Parelheiros, Guarulhos-Paço Municipal, Interlagos, Jacareí, Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, Pinheiros e Taboão da Serra, e também, a estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-IAG-USP). As localizações das estações meteorológicas podem ser visualizadas na Figura 24 e a descrição de suas características podem ser vistas no Apêndice B. Diante disto, os dados produzidos a partir de simulações foram comparados com os respectivos dados observacionais pertencentes a cada estação meteorológica.

Dados observacionais de umidade relativa do ar e velocidade do vento disponíveis para algumas das estações citadas também foram utilizados para a validação das simulações.

Figura 24 – Localização das estações meteorológicas utilizadas para a validação de dados

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

As áreas cinzentas representam as áreas urbanizadas da RMSP e as áreas em verde correspondem a parte vegetada da região

4.4 ANÁLISE SINÓTICA DE JANEIRO DE 2014

Na análise da situação sinótica de janeiro de 2014 foi feita uma compilação de estudos já produzidos para este mesmo período no Brasil. Para isso foram analisados boletins e cartas sinóticas sobre as condições atmosféricas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE), órgão brasileiro responsável por monitorar as condições meteorológicas do país. Os dados produzidos ficam disponíveis no site: <https://www.cptec.inpe.br/>.

Além disso, também foram utilizados dados dos boletins técnicos e relatórios do ano de 2014 produzidos pela estação meteorológica do IAG-USP e pelo Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC-USP). Os boletins são produzidos a partir de medidas da estação meteorológica do IAG-USP localizada na cidade de São Paulo disponíveis online: <http://www.estacao.iag.usp.br/boletim.php>. Já os relatórios elaborados pelo GREC-USP podem ser consultados em: http://www.grec.iag.usp.br/data/monitoramentoclimatico_BRA.php.

4.5 ICU A PARTIR DE DADOS OBSERVACIONAIS

A fim de se visualizar a ICU da RMSP a partir de dados observacionais, foram coletados dados de temperatura do ar próximo à superfície de estações meteorológicas em diferentes locais da RMSP. Para tal utilizaram-se dados das estações meteorológicas administradas pelo Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE) apresentadas na Figura 25. As estações utilizadas foram: Riacho Grande, Vila Mariana, Sé-CGE, Sé-Anhembi, Perus, Parelheiros, Freguesia do Ó, Santana/Tucuruvi, Pirituba, Vila Prudente, Vila Maria/Vila Guilherme, Ipiranga, Butantã, São Mateus, Lapa, M'Boi Mirim, Santo Amaro, Campo Limpo, Capela do Socorro, Aricanduva-Vila Formosa, Mooca, São Miguel Paulista, Itaquera e Itaim Paulista. Os dados foram obtidos por meio de solicitação por e-mail no site do CGE: <https://www.cgesp.org/v3/index.jsp>.

Infelizmente os dados de temperatura do CGE só começaram a ser coletados no fim de 2013, em razão disso os dados pertencentes a estas estações meteorológicas não puderam ser utilizados nas demais análises do presente trabalho. Com a inexistência de dados de anos anteriores a análise dos dados do CGE ficou

limitada ao ano de 2014. Uma caracterização das estações meteorológicas do CGE pode ser vista no Apêndice B.

A partir dos dados observacionais foi feita a média mensal de janeiro de 2014 do período diurno e noturno da temperatura do ar próximo à superfície de cada uma das estações meteorológicas. Com o intuito de investigar visualmente o padrão da ICU as médias de temperatura de cada estação foram referenciadas geograficamente e uma técnica de interpolação foi utilizada. Para isso, foi utilizada a opção *tricountor* da biblioteca Matplotlib para plotar figuras em 2D. A opção *tricountor* permite o desenho de contornos em grades triangulares utilizando a técnica de triangulação de Delaunay (HUNTER, 2007). Esta técnica foi empregada para realizar a interpolação das médias de temperatura de forma que fossem distribuídas espacialmente pela RMSP e criar o efeito visual das diferenças de temperatura do ar próximo à superfície.

Figura 25 – Localização das estações meteorológicas do CGE

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

As áreas cinzentas representam as áreas urbanizadas da RMSP e as áreas em verde correspondem a parte vegetada da região

4.6 INTENSIDADE DA ICU

A fim de se medir a intensidade da ICU na RMSP, foram simuladas e calculadas as diferenças da temperatura do ar próximo à superfície entre o ponto centro, considerado urbano, e os pontos norte, sul, leste e oeste, considerados rurais. Ou

seja, foi calculada a diferença de temperatura do ponto centro sempre em relação aos pontos considerados rurais por meio da Equação 5:

$$ICU = T_U - T_R \quad (5)$$

Onde T_U representa a temperatura do ar próximo à superfície no ponto centro e T_R representa a temperatura do ar próximo à superfície dos pontos considerados rurais.

Para se atender ao objetivo de comparar as características da ICU típica e atípica para janeiro, foi calculada a intensidade da ICU em: (a) uma média dos meses de janeiro em um período de 10 anos representando uma ICU típica e (b) em janeiro de 2014, considerada uma ICU atípica. A partir desta comparação foi possível identificar diferenças entre as características da ICU em 2014 e uma ilha de calor com condições típicas para a região.

Para a determinação da ICU típica foram simulados dados de temperatura do ar próximo à superfície dos meses de janeiro dos anos 2004 a 2013, período de 10 anos. Após isto, a ICU foi calculada usando a Equação 5 para cada valor horário de temperatura da série. Em seguida, foi feita uma média simples dos valores da ICU de todos os meses de janeiro compreendidos neste período, se chegando à intensidade da ICU típica.

Para definir a intensidade da ICU atípica foram feitas simulações da temperatura do ar próximo a superfície do mês de janeiro de 2014 e se aplicou a Equação 5 a fim de calcular as diferenças de temperatura entre os diferentes pontos na RMSP.

A fim de contabilizar fenômenos de maior escala que poderiam influenciar no comportamento da ICU, as intensidades da ICU típica e atípica foram calculadas separadas de acordo com as condições meteorológicas predominantes no dia. Os dias foram classificados em: (a) dias de predominância da brisa do mar; (b) dias de passagem de frente fria; (c) dias sem frentes, correspondentes a dias sem características da passagem da brisa do mar nem da frente fria sobre a RMSP; e (d) dias totais, em que todos os dias são contabilizados, independente das condições meteorológicas predominantes.

Os dias com passagem de frentes frias foram selecionados de acordo com o parecer de boletins técnicos de análises sinóticas disponíveis online no site do CPTEC-INPE (2014a), em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>.

Já o critério para a classificação de dias sob a influência da brisa do mar na RMSP foi feito de modo similar a metodologia usada em Perez e Silva Dias (2017). Neste trabalho a atuação da brisa do mar em um dia foi identificada por meio da ocorrência simultânea de: diminuição da temperatura do ar próxima a superfície em um mesmo horário, mudança na direção do vento para sudeste durante o período diurno e ausência da ocorrência de frente fria no dia.

É preciso esclarecer que em caso de dias que apresentaram sinais de frente fria e brisa do mar, o dia foi classificado somente como de frente fria. Logo, os dias sem frentes foram classificados como os que não apresentaram os critérios característicos dos dias de brisa do mar nem da passagem de frentes frias.

Este critério foi aplicado nos dados de temperatura do ar próximo superfície e direção do vento das estações meteorológicas da CETESB (2018) disponíveis online no seu Sistema de Informações da Qualidade do Ar: <http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>.

A partir desta classificação, foi calculada a intensidade da ICU diurna separada de acordo com as classificações de condições atmosféricas predominantes: (a) intensidade da ICU em dias de brisa do mar; (b) intensidade da ICU em dias de passagem de frente fria; (c) intensidade da ICU em dias sem frentes; e (d) intensidade da ICU no total dos dias.

A Tabela 1 mostra o número de dias no mês de janeiro entre os anos de 2004 a 2014 sob a atuação predominante da brisa do mar, frentes frias e dias sem frentes.

Tabela 1- Número de dias sob a atuação de frentes frias, brisa do mar e dias sem atuação de frentes

Ano	Dias com frente fria	Dias com brisa marítima	Dias sem frentes
2004	12	13	6
2005	13	9	9
2006	4	22	5
2007	13	6	12
2008	17	9	5
2009	10	10	11
2010	4	16	11
2011	8	14	9
2012	8	16	7
2013	19	4	8
Média 2004-2013	10,8	11,9	8,3
2014	0	18	13

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

4.7 BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE

O modelo simulou valores das componentes do balanço de energia na superfície, correspondentes a radiação líquida, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. O fluxo de calor armazenado foi calculado como o resíduo no balanço de energia, a partir da Equação 4 (Seção 3.2.2). Ainda é preciso esclarecer que o fluxo de calor antropogênico não foi contabilizado no fluxo de calor sensível nas simulações do modelo. Isto foi decidido porque o valor do fluxo de calor antropogênico mostrou-se baixo para um estudo feito na cidade de São Paulo (FERREIRA et al., 2013), justificando sua não contabilização nas simulações.

Foram simuladas as componentes do balanço de energia dos pontos centro, norte, sul, leste e oeste para o período do mês de janeiro considerado típico, correspondente à média de janeiros 2004 a 2013, e o janeiro considerado atípico, correspondente ao janeiro de 2014.

Foi gerado também o perfil médio diurno do balanço de energia para a RMSP para os diferentes pontos empregados neste estudo em ambos os períodos.

4.8 CORTE VERTICAL DA ATMOSFERA

Com o intuito de investigar efeitos da presença da urbanização na circulação atmosférica da RMSP, foram realizadas simulações do perfil vertical da região em sentido norte – sul, como visto na Figura 3. Para isolar o efeito da urbanização foram realizados dois tipos de simulações: (a) caso real, em que a urbanização da RMSP está presente e (b) caso sem urbanização, em que a cobertura do solo real da parte urbanizada foi substituída pela opção de vegetação de savana do modelo.

As simulações foram feitas para o dia 02 de janeiro de 2014, pois foi classificado como um dia sem frentes. Um dia sem a influência de frentes foi escolhido para a análise porque estes são dias em que é possível observar a circulação da ICU de forma mais isolada. Outros tipos de circulação mais intensas podem se sobrepor a circulação da ICU e dificultar a visualização do seu efeito no campo de temperatura de uma região (HILDEBRAND; ACKERMAN, 1984; FREITAS; SILVA DIAS, 2005).

A partir disto foram calculadas a altura da camada limite e as diferenças nos valores de temperatura potencial e intensidade dos ventos meridional e vertical entre a simulação do caso real e a simulação sem a urbanização. Considerou-se nos cálculos os valores do caso real subtraídos os valores do caso sem a urbanização. A diferença entre os dois cenários foi apresentada na forma de figuras com o perfil vertical da atmosfera em seção norte - sul na RMSP.

5 RESULTADOS

Nesta seção, estão presentes os resultados do estudo na seguinte ordem:

- (a) resultados da etapa de validação das simulações produzidas pelo modelo;
- (b) condições sinóticas para janeiro de 2014, a fim de explicar o comportamento anômalo de temperatura do ar e precipitação registrados na RMSP;
- (c) campo de temperatura média do ar próximo à superfície na RMSP para janeiro de 2014 em diferentes condições atmosféricas;
- (d) apresentação da variação entre a intensidade da ICU atípica e típica;
- (e) comparação do balanço de energia do período típico e atípico; e
- (f) comparação da circulação atmosférica entre um cenário urbanizado e outro sem urbanização na RMSP.

Enfim, é necessário esclarecer que a análise dos resultados deste estudo foi inteiramente realizada fazendo referência ao horário local.

5.1 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Para a validação das simulações do modelo foram comparados valores simulados de temperatura do ar próximo à superfície, umidade relativa e velocidade do vento com os correspondentes valores observados em diferentes estações meteorológicas. A fim de melhorar a performance das simulações foram realizados alguns ajustes descritos abaixo.

Na primeira série de simulações, utilizaram-se as configurações padrão partir do modelo global *Global Forecasting System* (GFS) como condição inicial e de fronteira. A partir disso, compararam-se valores de temperatura do ar próximo à superfície das estações meteorológicas descritas na seção 4.3 com os valores simulados pelo modelo. A análise dos testes aplicados evidenciou discrepâncias entre os valores simulados e observacionais principalmente no período noturno.

Na tentativa de aumentar a performance das simulações, os resultados do modelo global ERA-Interim passaram a ser utilizados como condição inicial e de fronteira, ao invés do GFS, e foram incluídos dados variáveis da temperatura da superfície do mar. Além disso, o modelo foi rodado em intervalos de semanas ao invés de rodar o mês de janeiro inteiro de uma única vez. Visto isto, houve uma pequena melhora na performance do modelo ao comparar com as simulações utilizando as configurações anteriores.

Porém, notou-se uma queda brusca de temperatura das simulações em comparação aos dados observacionais entre as primeiras horas da manhã nas estações Capão, Carapicuíba, Guarulhos, IAG, Interlagos, Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, Pinheiros e Taboão. Isto poderia ser explicado pelo fato de o modelo ter sido rodado em semanas e utilizado os dados iniciais globais em todo começo de semana apresentando discrepâncias em relação aos dados reais neste período.

Assim, em uma nova série de simulações utilizando as mesmas configurações das simulações anteriores, o modelo passou a ser rodado em intervalos de semanas ao invés de rodar o mês de janeiro inteiro de uma única vez por meio do *restart*. No *restart* são considerados na simulação da semana seguinte os dados do último dia da

simulação da semana anterior, ao invés de utilizar apenas os dados do modelo global novamente como condição inicial e de fronteira.

Também foram adicionadas mais variáveis para a validação: além de dados da temperatura do ar próxima à superfície, foram avaliadas a umidade relativa e a velocidade do vento. A partir disso, as discrepâncias típicas dos começos de semana notadas na série de simulações sem *restart* foram suavizadas.

Com base na observação das validações feitas, notou-se que o dia 10/01/2014, Figura 26, foi o dia que apresentou simulações mais discrepantes de temperatura do ar próximo à superfície em comparação com os dados observacionais. Apesar de não ilustrado em forma de figura, foi visto que neste dia, principalmente no período da tarde, a direção do vento produzida pelo modelo foi predominantemente de norte. Enquanto no mesmo período os dados observacionais indicavam ventos majoritariamente de sul. Isto sugere que o modelo não teve muito sucesso ao simular a chegada da frente de brisa do mar. Pois, a frente de brisa costuma chegar no período da tarde na RMSP, mudando o padrão do vento de característica sinótica, vindo de norte, induzindo ventos de sul ao se propagar sobre a região.

Após isso, outras tentativas para a melhorar o desempenho do modelo foram realizadas como, por exemplo, alterações de domínio, resolução e configurações da umidade do solo, porém não foram identificadas melhorias significativas.

Figura 26 – Comparação da temperatura do ar próxima à superfície modelada e observada para Capão Redondo

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Gráfico com a comparação da média diurna de temperatura do ar próxima à superfície de dados simulados pelo modelo, em azul, e dados observados, em laranja, para a estação meteorológica de Capão Redondo entre os dias 08 a 15 de janeiro de 2014

A partir da adoção das modificações descritas foi possível observar pequenas melhoras nos resultados dos testes estatísticos aplicados e na redução de algumas discrepâncias entre valores simulados e observados em alguns períodos nas simulações.

Dentre as variáveis avaliadas, as simulações de temperatura do ar próximo à superfície apresentaram melhor concordância com os dados observacionais, como pode ser visualizado na Tabela 2. As correlações entre as simulações e observações foram consideradas satisfatórias, em torno de 70%, mesmo que não tenham se mostrado muito fortes. Nas análises de erro médio quadrático, raiz quadrada do erro médio quadrático e *bias* os valores foram baixos, não se distanciando muito do valor ideal zero, portanto apresentaram simulações condizentes com as observações. Os resultados dos testes de *index of agreement* e *hit rate* também mostraram boa concordância entre os valores simulados e observados, pois ficaram próximos ou não se distanciaram demasiadamente de 1.

Para o caso das simulações de umidade relativa e velocidade do vento, não mostradas aqui em forma de tabela, ainda que apresentassem maior concordância em alguns testes e menor em outros foram considerados satisfatórios. Visto isto, as simulações do modelo foram consideradas satisfatórias.

Tabela 2 – Valores dos testes de validação da temperatura do ar próxima a superfície no mês de janeiro de 2014

Estação	R²	MSE - Erro médio quadrático	RMSE- Raíz quadrada do erro médio quadrático	Bias	IOA - Index of agreement	HR - Hit rate
Capão Redondo 23,66° S 46,78° O	0,69	6,3	2,51	1,14	0,88	0,57
Carapicuíba 23,53° S 46,84° O	0,75	4,24	2,06	0,74	0,92	0,66
Parelheiros 23,78° S 46,7° O	0,71	9,01	3,0	1,77	0,86	0,47
Guarulhos-Paço Municipal 23,46° S 46,52° O	0,75	5,38	2,32	1,16	0,9	0,66
Interlagos 23,68° S 46,68° O	0,66	7,33	2,71	1,36	0,87	0,61
Jacareí 23,29° S 45,97° O	0,72	6,27	2,5	0,18	0,92	0,57
Marginal Tietê 23,52° S 46,74° O	0,74	4,13	2,03	0,59	0,91	0,71
Pinheiros 23,56° S 46,7° O	0,74	5,11	2,26	0,5	0,91	0,63
Taboão da Serra 23,61° S 46,76° O	0,73	4,65	2,15	0,68	0,91	0,66
IAG-USP 23,65° S 46,22° O	0,66	7,33	2,71	1,36	0,87	0,61

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

5.2 CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA EM 2014

O ano de 2014 como um todo foi atipicamente quente e seco na RMSP, como pode ser visto nas Figuras 4, 5 e 6, que mostram anomalias de temperatura do ar próximo à superfície, precipitação acumulada e umidade relativa em comparação com suas respectivas médias climatológicas. Neste ano foram registrados três recordes de temperatura máxima do ar próximo à superfície, durante os meses de janeiro e fevereiro (36,1 °C, maior temperatura registrada até então) e outubro (37,2°C) na estação meteorológica IAG-USP. Ainda foi visto que a temperatura média do ar próximo à superfície foi 8,5% acima da média climatológica registrando 109 dias de temperaturas acima dos 30°C quando a média é de 47 dias. Quanto a precipitação em 2014, foi cerca de 13% menor em relação à média climatológica, considerando o período entre 1933-2014 (IAG-USP, 2014b).

Estas anomalias de temperatura e precipitação na RMSP foram especialmente marcantes durante a estação do verão. Entre dezembro de 2013, janeiro e fevereiro de 2014 choveu somente 352,5 mm, o equivalente a 55% da média climatológica,

registrando o maior número de dias com umidade do ar menor ou igual a 30% considerando o período entre 1933-2013 (IAG-USP, 2014c). Ainda foram registradas temperaturas do ar próximo à superfície acima da média neste período, com destaque para o mês de janeiro de 2014 que teve a média mensal mais quente em relação aos meses de janeiro de anos anteriores, 2,6°C acima da média climatológica considerando o período 1933-2013 (IAG-USP, 2014c). Assim, houve 23 dias com temperatura do ar próximo à superfície superior ou igual a 30°C no mês de janeiro de 2014 quando a média climatológica é de 6 dias (IAG-USP, 2014c).

Durante janeiro de 2014 também se destacou a quantidade de irradiação solar global registrada na RMSP. Registrou-se o recorde de 732,5 MJ.m⁻² quando a média climatológica é de 602,2 MJ.m⁻² considerando o período de 1961-2013, como pode ser visto na Figura 7 (IAG-USP, 2014b). Este recorde de irradiação solar global poderia estar relacionado com a pouca nebulosidade registrada neste período (IAG-USP, 2014c).

Em 2014 as anomalias de temperaturas máximas e o déficit de precipitação não ficaram restritas à RMSP e foram vistas em outras regiões do Brasil em intensidades diferentes. Por meio da Figura 27a foi possível notar que anomalias de precipitação negativa ocorreram em quase todo o território brasileiro. Como reflexo da estiagem também foram vistas anomalias de temperatura positivas, Figura 27b, principalmente na região sudeste. Pode-se explicar estas anomalias encontradas na região sudeste do Brasil devido a um bloqueio atmosférico persistente desfavorável a entrada de sistemas frontais e formação de sistemas precipitantes (GREC-USP, 2014). Nas subseções seguintes estão descritas as condições atmosféricas de escala sinótica no Brasil em janeiro de 2014 que poderiam explicar as anomalias de precipitação, irradiação solar global e temperatura do ar próximo à superfície encontradas na RMSP.

Figura 27 – Anomalias de precipitação e temperatura em janeiro de 2014

Fonte: CPTEC-INPE (2014b)

Anomalias de: (a) precipitação em mm e (b) temperatura máxima em °C para o mês de janeiro de 2014. O círculo destaca as anomalias positivas de temperatura concentradas no sudeste brasileiro.

5.2.1 Temperatura da superfície do mar

Em análise da temperatura da superfície do mar que banha o continente sul americano em janeiro de 2014, observou-se que o Oceano Pacífico tropical apresentava valores abaixo da média. Isto indicou que o El Niño Oscilação Sul (ENOS) estava em sua fase neutra neste período (GREC-USP, 2014).

Já no Oceano Atlântico sul nas costas sul e sudeste do Brasil foram vistas anomalias positivas de temperatura da superfície do mar, enquanto sobre a costa leste da Argentina foram vistas anomalias negativas. A presença deste padrão de dipolo anômalo sobre o Oceano Atlântico Sul criou condições favoráveis para a permanência de frentes sobre o sudeste brasileiro. Porém a existência de uma circulação anti-ciclônica anômala sobre a parte central do Brasil impediu que as frentes frias alcançassem o sul e sudeste brasileiro (GREC-USP, 2014).

5.2.2 Frentes no hemisfério sul

Foram vistas anomalias negativas na formação de ciclones ao redor e próximas a Antártica. Por meio da análise do padrão de anomalias de densidade de trajetória de ciclones foi possível identificar a fase negativa do Modo Anular Sul (MAS), com valor de -0,683 em janeiro de 2014 (GREC-USP, 2014).

Dessa forma, durante janeiro de 2014 foram identificados 70 sistemas ciclônicos com vida superior a 24 h. Destes, 21 chegaram a América do Sul e somente 2 atuaram no sul do Brasil, sendo que 1 deles chegou ao sul do estado de São Paulo (GREC-USP, 2014) como pode ser visto na Figura 28. Este comportamento relativamente anômalo poderia estar relacionado a atuação do bloqueio atmosférico visto no Oceano Atlântico (CPTEC-INPE, 2014b).

Figura 28 –Sistemas frontais no Brasil em janeiro de 2014

Fonte: CPTEC-INPE (2014b)

Sistemas frontais que atuaram no Brasil e seu deslocamento pelo país no mês de janeiro de 2014.

5.2.3 Circulação atmosférica

As causas de anomalias observadas em superfície puderam ser explicadas por meio da observação em diferentes níveis dos padrões de circulação atmosférica de escala sinótica no mês de janeiro de 2014.

Dessa forma, em altos níveis à 250 hPa, observou-se a presença da Alta da Bolívia (AB) deslocada mais à esquerda e em formato mais estreito comparada ao seu comportamento em relação à climatologia. Além disso, foi visto um Vórtice do Nordeste (VNE) mais intenso também deslocado a esquerda em relação à climatologia, como visto na Figura 29. Este padrão favoreceu a subsidência do ar na camada média da atmosfera, contribuindo para a inibição de chuvas entre o norte do Sudeste e Centro-oeste do Brasil (CPTEC-INPE, 2014b).

Figura 29 – Anomalias de vento zonal em 250 hPa em janeiro de 2014

Fonte: CPTEC-INPE (2014b)

À 500 hPa foi vista a presença de uma crista anômala durante quase todo o mês de janeiro sobre o Oceano Atlântico, enquanto no Oceano Pacífico observou-se um máximo anômalo de altura geopotencial, na Figura 30. Este padrão de máximos no Atlântico e no Pacífico determinaram um padrão de circulação do tipo bloqueio. Isto causou a diminuição de transientes em direção ao Oceano Atlântico, e como consequência, não foi observado nenhum episódio de ZCAS sobre o Brasil (CPTEC-INPE, 2014b).

Figura 30 – Anomalia geopotencial em 500 hPa em janeiro de 2014

Fonte: CPTEC-INPE (2014b)

Na Figura 31 é possível notar um fluxo anômalo, indicado em tons azuis, entre o sul da região amazônica e oeste da região Sul do Brasil, caracterizado como Jato de Baixos Níveis (JBN). Estes foram responsáveis por advectar o ar quente e úmido em camadas mais baixas para o norte da Argentina, Paraguai e porção oeste do sul do Brasil. Além disso, houve a presença de um outro fluxo anômalo na borda ocidental do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), produzindo uma configuração de vento contrário à climatologia, ou seja, uma ZCAS negativa. O padrão de circulação formado inibiu a formação de chuvas sobre o Sudeste e Centro-oeste brasileiro (CPTEC-INPE, 2014b).

Figura 31 – Anomalia de vento meridional em 850 hPa em janeiro de 2014

Fonte: CPTEC-INPE (2014b)

Na circulação atmosférica de superfície foi possível observar a atuação do ASAS localizado mais a oeste e com maior intensidade em relação à climatologia. Ainda foram vistas anomalias positivas de pressão em parte do Sudeste e Centro-oeste brasileiro, reflexo do padrão anômalo encontrado à 500 hPa que contribuiu para a inibição do mecanismo de levantamento do ar e, conseqüentemente, redução de chuvas (CPTEC-INPE, 2014b).

Visto isto, o conjunto das circulações atmosféricas em diferentes níveis originou a presença de um bloqueio atmosférico na alta e média troposfera. Em 250 hPa houve a formação de um dipolo com mínimo, representado por V, entre o Sudeste e Centro-oeste, e um máximo, representado por A, sobre o Oceano Atlântico, originando o padrão de bloqueio em janeiro de 2014. Isto fez com que surgisse um máximo anômalo de temperatura em 850 hPa, em tons de verde/amarelo na Figura 32, associado à subsidência de ar do bloqueio atuando em toda a coluna atmosférica, que foi responsável pela estiagem no Sudeste do Brasil (CPTEC-INPE, 2014b).

Figura 32 – Anomalia geopotencial em 250 e 850 hPa em janeiro de 2014

Fonte: CPTEC-INPE (2014b)

Anomalia geopotencial está representado em linhas e anomalias de temperatura expressa em escala de cores.

Na Figura 33 é possível observar uma comparação da circulação atmosférica entre um verão considerado normal e o verão no começo de 2014. A Figura 33a representando a circulação atmosférica de um verão normal mostra o transporte de umidade vindo da Amazônia pelos JBN que contribuem para a formação da ZCAS e

ativação de sistemas frontais. Esta circulação colabora para a ocorrência de chuvas na região Sudeste.

A Figura 33b apresenta a circulação atmosférica do verão do início de 2014, quando a condição de bloqueio atmosférico impediu que o fluxo de umidade vindo da Amazônia chegasse à região Sudeste pelos JBN e as frentes frias ficaram restritas a região Sul. Em razão disso, a ZCAS não se configurou e houve déficit de precipitação na região Sudeste.

Figura 33 – Elementos relevantes ao transporte de umidade na América do Sul

Fonte: Marengo et al. (2015)

(a) corresponde ao verão normal ou climatológico e (b) ao verão quente e seco de 2014.

5.3 TEMPERATURA EM 2014

Em análise aos dados de temperatura média diária do ar próximo à superfície simulados pelo modelo para a RMSP, na Figura 34, observou-se que as temperaturas do ponto centro permaneceram mais elevadas em relação às temperaturas dos pontos considerados rurais durante todo o mês de janeiro. Este comportamento sugere a presença da ICU durante todo o dia, exceto entre às 7 h e 9 h, quando a temperatura dos pontos rurais e do ponto centro mostraram-se semelhantes, uma vez que a área urbana demorou uma hora a mais para iniciar seu aquecimento em relação aos pontos rurais. À noite também se observou que a região do ponto centro respondeu termicamente de forma mais lenta ao cessar dos raios solares, pois, as regiões dos pontos rurais resfriaram de forma mais acentuada que a região do ponto centro, isto foi evidente entre as 18 h e 19 h.

Em relação às diferenças de comportamento entre os pontos observou-se que as temperaturas dos pontos norte, leste e oeste foram parecidas entre si no período diurno. Já o ponto sul apresentou temperaturas menores entre às 10 h e às 18 h, quando foi possível observar a queda de temperatura mais cedo que para os outros pontos. Diferente do comportamento apresentado pelos demais pontos, no ponto sul o pico de temperatura do ar próximo à superfície não ocorreu às 12 h e sim por volta das 10 h, seguido de queda nas próximas horas, indicando uma interrupção no seu processo de aquecimento pelos raios solares ou chegada de um ar com menores temperaturas. Isto poderia ser explicado pelo efeito da passagem da brisa do mar, que vem de sudeste e alcança primeiro a região sul, resultando na queda de temperatura antecipada em relação às outras regiões da RMSP.

Visto isto, as respectivas temperaturas médias para todo o mês de janeiro de 2014 foram de 24,95°C para o ponto centro; 22,61°C para o ponto oeste; 22,47°C para o ponto leste; 22,28°C para o ponto norte e 21,95°C para o ponto sul. De forma geral, todos os pontos apresentaram temperaturas mais amenas durante as primeiras horas da manhã e mais elevadas durante o período da tarde.

Figura 34 –Evolução diurna de temperatura do ar próxima a superfície simulada pelo modelo

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Temperatura média horária do ar próximo a superfície simulada para os pontos centro em cinza, oeste em preto, leste em verde, norte em vermelho e sul em azul durante o mês de janeiro de 2014.

5.3.1 Campo de temperatura na RMSP

A fim de se visualizar a distribuição espacial da temperatura do ar próximo à superfície na RMSP, foram geradas figuras com médias dessa variável para janeiro de 2014. Para observar os efeitos de diferentes condições atmosféricas no campo de temperatura do ar próximo à superfície, as figuras foram classificadas em: (a) todos os dias do mês de janeiro, (b) dias sob influência da brisa do mar e (c) dias sem influência de frentes. Para cada uma destas classes de condições atmosféricas ainda foram geradas figuras divididas em: (a) médias para todos os horários do dia, (b) médias do período diurno e (c) médias do período noturno, como pode ser visto na Figura 35.

Assim, foi visto que as temperaturas médias simuladas considerando todas as condições atmosféricas e horários para o ponto centro, representado pela letra C na Figura 35, permaneceram mais elevadas em relação aos pontos norte, sul, leste e oeste, representados pelas letras N, S, E e W, respectivamente, classificados como rurais. Isto se mostra de acordo com o visto na Figura 34, indicando temperaturas médias mais elevadas no ponto centro durante todo o período analisado.

As diferenças de temperatura foram mais visíveis durante o período noturno, na Figura 35c, apresentando uma figura com um padrão de maiores temperaturas sobre a área urbana, enquanto no período diurno o desenho permanece mais uniformizado. Assim, foi possível notar que o padrão de ICU formada no período noturno coincide com as áreas urbanizadas na RMSP, que podem ser vista na figura 21, indicando que as áreas mais urbanizadas apresentaram maiores temperaturas.

Outro comportamento comum em todas as situações foi a ocorrência de médias de temperatura ligeiramente menores na região sudeste da RMSP em comparação às outras regiões.

Em relação ao padrão de distribuição da ICU na RMSP, foi visto que os padrões foram semelhantes entre as médias considerando todo o período, Figura 35a, 35b e 35c, e dias sob influência da brisa do mar, Figura 35d, e, e f. Esta semelhança sugere que os dias com brisa têm importante contribuição na média para todos os dias.

Já nos dias sem influência de frentes, o padrão de distribuição da ICU em comparação com as outras situações foi diferenciado. Nos dias em que não houve a atuação de frentes, considerando todos os horários do dia na Figura 35g, o gradiente de temperatura entre a área urbanizada e os pontos rurais foi menor. Assim, se

observou a formação de uma ICU com um padrão de temperatura mais uniformizado sobre toda a RMSP. No caso das médias de temperatura em dias sem frentes considerando somente o período diurno, Figura 35h, notou-se que o padrão de distribuição da ICU mais intensa característica da região central estendeu-se em direção as regiões leste e sul. O mesmo padrão foi visto nos dias sem frentes para o período noturno com a ICU mais intensa se estendendo em direção ao sul, Figura 35i.

Ao comparar as médias do campo de temperatura entre as diferentes situações atmosféricas, notou-se que, nos dias sem influência de frentes, as temperaturas médias foram menores sobre a região central mais urbanizada em comparação com as outras condições atmosféricas. Porém, no período noturno, as áreas menos urbanizadas e rurais apresentaram temperaturas mais elevadas em comparação com outras condições. Observou-se também que o gradiente de temperatura apresentou menor variação nas simulações considerando somente os dias sem a atuação de frentes, mostrando um campo de temperatura mais uniforme em comparação com as outras condições atmosféricas.

Por fim, ao observar as médias de temperatura nas escarpas da Serra do Mar e litoral entre as diferentes situações atmosféricas, foram vistas temperaturas mais elevadas principalmente em dias sem a atuação de frentes. Dessa forma, observou-se que o calor parece concentrado na região litorânea, Figura 35h. Isto sugere que o vento em condições sem frentes para o mês de janeiro de 2014 teve direção majoritariamente de noroeste. Quando este vento de noroeste chegou à escarpa, criou um fluxo descendente que aquece adiabaticamente o ar sobre a costa, tornando o local mais quente nesta situação.

Figura 35 – Campo de temperatura do ar simulado para a RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Média do campo de temperatura do ar próxima a superfície simulada pelo modelo para a RMSP em janeiro de 2014 para: (a) todos os horários; (b) período diurno ; (c) período noturno; (d) somente dias com brisa do mar em todos os horários; (e) somente dias com brisa do mar no período diurno; (f) somente dias com brisa do mar no período noturno; (g) somente dias sem atuação de frentes em todos os horários; (h) somente dias sem atuação de frentes no período diurno e; (i) somente dias sem atuação de frentes no período noturno. A escala de cores representa a temperatura em Kelvin. As letras representam a localização dos pontos simulados, na qual, C corresponde ao ponto centro, N ao ponto norte, S ao ponto sul, E ao ponto leste e W ao ponto oeste.

A fim de traçar uma comparação entre o campo de temperatura simulado para a RMSP foram geradas figuras do campo de temperatura do ar próximo à superfície a partir de dados observacionais na Figura 36. Para isso foram utilizados dados de estações meteorológicas do CGE do mês de janeiro de 2014 espalhadas pela RMSP e foram feitas médias separadas em período diurno e noturno para todo o mês. Após isto, por meio de interpolação dos dados, foi possível gerar figuras com a espacialização das estações meteorológicas e suas respectivas temperaturas médias observadas, como pode ser visto na Figura 36. Ainda é preciso esclarecer que os

pontos C, N, S, E e W na Figura 36 foram colocados somente para fins de referência de espacialização, pois não foram utilizados dados de temperatura simulados pelo modelo especificamente nesta figura.

A partir da observação das figuras foi possível notar um padrão de espacialização de temperatura do ar próximo à superfície semelhante ao simulado pelo modelo. A região próxima ao ponto centro permaneceu com temperaturas mais elevadas durante os períodos diurno e noturno. Em contraste, a região próxima ao ponto sul apresentou temperaturas mais amenas.

Como também visto no campo de temperatura simulado, Figura 35, a intensidade da ICU noturna foi maior e durante o período diurno o padrão de temperatura foi distribuído de forma mais uniforme na RMSP. Por fim, observou-se que somente no período diurno houve a formação de uma área de temperatura ligeiramente mais amena em relação aos seus arredores na região nordeste da RMSP.

Figura 36 – Campo de temperatura do ar a partir de dados observacionais na RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Média do campo de temperatura do ar próxima a superfície a partir de dados de estações meteorológicas na RMSP em janeiro de 2014 para: (a) período diurno e (b) período noturno. A escala de cores representa a temperatura em °C. As letras representam a localização dos pontos simulados, na qual, C corresponde ao ponto centro, N ao ponto norte, S ao ponto sul, E ao ponto leste e W ao ponto oeste.

5.3.2 Brisa do mar sobre a RMSP

Um dos fenômenos que mais influencia o campo de temperatura na RMSP é a brisa do mar, que passa pela região e leva uma massa de ar mais úmida e fria de sudeste vinda do oceano. A passagem da brisa do mar pela RMSP pôde ser vista na Figura 37 que mostra o campo de temperatura do ar próximo a superfície simulada pelo modelo em diferentes horas no dia 06 de janeiro de 2014. Neste dia, observou-se um pico na intensidade da ICU de 7,48 °C entre os pontos centro e sul às 13h, no qual a influência da brisa do mar na RMSP foi bem marcante.

Na Figura 37a a formação da frente de brisa do mar tornou-se evidente por volta das 11 h com a indicação de temperaturas menores próximas à região litorânea e escarpas da Serra do Mar, correspondente à região a sudeste da RMSP, representadas pela coloração mais azulada.

Nas horas seguintes, a frente de brisa do mar avançou em direção a RMSP, causando a diminuição de temperatura, sendo que às 13 h já era possível visualizar sua chegada no ponto sul na Figura 37b. Simultaneamente, observou-se de forma mais clara a mudança da direção do vento, que era predominantemente de nordeste e passou a ser de sudeste no sul da RMSP com a chegada da frente de brisa. Assim, às 15 h, a frente da brisa do mar alcançou a região do ponto leste (Figura 37c), às 16 h a região do ponto oeste (não ilustrado) e às 17 h chegou próxima ao ponto centro, Figura 37d. Por volta das 18 h foi possível observar a passagem da brisa do mar próximo ao ponto norte (não ilustrado) e às 19 h (Figura 37e) toda a RMSP estava já havia sofrido a influência da brisa do mar.

Às 21 h (Figura 37f), foi visto que a direção predominante do vento era de sudeste, com intensidade menor em relação aos horários anteriores. Neste horário foi possível observar a presença da ICU mesmo após a passagem da brisa do mar. Porém, o padrão de distribuição espacial da ICU não aparentou ser o mesmo encontrado antes das 13 h (Figura 37b), horário em que grande parte da RMSP não havia ainda sofrido influência da brisa do mar. Isto pôde ser notado, pois o padrão de distribuição da ICU visto às 21 h seguia um padrão de gradiente de temperatura em que a região sul apresentava temperaturas mais baixas, que aumentavam em direção ao norte. A partir disto, pôde-se observar que em dias de brisa do mar a ICU sofre uma mudança no seu padrão de distribuição espacial. O formato da ICU com o centro da RMSP mais quente e arredores com temperaturas mais amenas foi modificado

com a influência da brisa e passou a apresentar a região norte mais quente e temperaturas mais amenas em direção ao sul. Este efeito pôde ser visto também na Figura 35, ao comparar a distribuição espacial da temperatura do ar próximo a superfície de dias com influência da brisa do mar e dias sem influência de frentes. Na Figura 35, também a região sul apresentou temperaturas mais próximas às da região centro em dias sem frentes, enquanto foram observadas temperaturas mais baixas nos dias de brisa do mar.

Figura 37 – Passagem da brisa do mar pela RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Passagem da brisa do mar pela Região Metropolitana de São Paulo no dia 06 de janeiro de 2014, no qual, (a) representa temperaturas às 11h, (b) às 13h, (c) às 15h, (d) às 17h, (e) às 19h e (f) às 21h. As diferentes escalas de cores representam a temperatura do ar próxima a superfície em °C e as setas representam a direção e intensidade do vento, no qual o valor de referência é 10 m/s. Os eixos x e y representam a latitude e longitude respectivamente. Os pontos de referência utilizados no estudo estão indicados pelas letras: C representando o centro, N representando o norte, S representando o sul, E representando o leste e W representando o oeste.

5.4 INTENSIDADE DA ICU PARA A RMSP

Nesta seção foi feita uma análise das características da ICU típica para a RMSP a partir da média dos meses de janeiro entre 2004 a 2013 e da ICU atípica correspondente a janeiro de 2014.

A intensidade da ICU na RMSP, para ambos os cenários, foi analisada a partir de dados simulados de temperatura do ar próximo a superfície do mês de janeiro para os diferentes pontos do presente estudo: centro, norte, sul, leste e oeste. Dessa forma, a intensidade da ICU foi calculada a partir da subtração da temperatura dos pontos considerados rurais da temperatura do ponto centro.

Para comparar as características da ICU entre os cenários típico e atípico sob o efeito de fenômenos de maior escala, foram gerados gráficos com a intensidade da ICU diurna separada em dias sob diferentes condições atmosféricas comuns para janeiro na RMSP, presentes nas Figuras 38 e 39. Dessa forma, foram feitos gráficos para o cenário típico e o cenário atípico: (a) considerando todos os dias do mês de janeiro; (b) considerando somente dias sob influência predominante da brisa do mar; (c) considerando somente dias sob influência predominante de frente fria; e (d) considerando somente dias sem a atuação de frentes.

Os cenários típico e atípico foram comparados em diferentes condições atmosféricas a fim de se determinar diferenças entre estes. Ainda é preciso esclarecer que não houve indícios de influência significativa da atuação de frentes frias para a RMSP em janeiro de 2014, em razão disso, não foi possível fazer a comparação da ICU entre o período típico e atípico para o caso de frente fria. A seguir encontra-se a análise da ICU considerada típica para a RMSP.

5.4.1 ICU típica

A fim de se determinar uma ICU com características típicas para a RMSP, foi calculada a média da intensidade da ICU para os meses de janeiro dos anos de 2004 a 2013. Por meio disto foi possível identificar o comportamento típico da ICU sob a influência de fenômenos de maior escala. Abaixo estão descritos o comportamento da intensidade da ICU típica dos diferentes pontos, separados pelas diferentes condições atmosféricas já descritas anteriormente.

5.4.1.1 ICU típica – brisa do mar

Em dias em que a brisa do mar teve influência predominante na RMSP, a ICU mostrou-se mais intensa para todos os pontos no período noturno em comparação com os dias com frente fria e dias sem a atuação de frentes. No período diurno ocorreu o inverso, pois a ICU dos dias de brisa foi menos intensa que em outras condições. Foi possível notar que este padrão ocorreu devido às taxas de diminuição da ICU pela manhã e aumento da ICU durante a noite terem sido consideravelmente maiores em relação aos dias de frente fria e dias sem frentes.

A Figura 38b permite uma observação do comportamento diurno da ICU em dias de brisa do mar. Foi possível observar que entre as 0 h e 6 h, período sem radiação solar, o comportamento da intensidade da ICU foi semelhante entre todos os pontos, com diminuição de sua intensidade de forma gradual a taxas parecidas.

Após o nascer do sol, entre as 6 h e 7 h, com o aquecimento da superfície e do ar próximo a esta, observou-se uma diminuição da intensidade da ICU de forma mais acentuada, como visto na Figura 38b. Neste intervalo a intensidade da ICU para os pontos norte, sul e leste diminuiu cerca de 1°C, enquanto em relação ao ponto sul a diminuição foi próxima a 2°C. Isto poderia ser explicado pelo fato de entre as 6 h e 7 h as regiões não urbanizadas sofrem aquecimento com a radiação solar, enquanto a região urbanizada ainda estava sofrendo resfriamento no mesmo horário. A região do ponto centro começou a aquecer somente entre 7 h e 8 h, uma hora após os pontos das regiões consideradas rurais. Esta resposta térmica mais lenta da área urbanizada em relação à rural no período da manhã pode ser vista como no exemplo da Figura 34 que mostra a temperatura do ar diurna próxima a superfície em de janeiro de 2014.

Na Figura 38b, a partir das 7 h, a intensidade da ICU para os pontos norte e oeste continuou se comportando de forma semelhante, permanecendo mais estável pelo resto da manhã e começo da tarde, exceto por um leve aumento de intensidade na ICU às 14 h, seguido de queda na hora seguinte, formando um pequeno pico à tarde. Após isto, a intensidade da ICU em relação ao ponto norte aumentou de forma gradual entre as 15 h e 18 h.

Entre as 18 h e 19 h na Figura 38b, horário em que o sol se põe, a intensidade da ICU para os pontos norte e oeste aumentou de forma evidenciada em pelo menos 1 °C. Às 19 h, a intensidade da ICU em relação ao ponto norte registrou o seu pico diurno de 4,2°C, sofrendo uma leve queda nas próximas horas até o fim do dia. Já a

intensidade da ICU em relação ao ponto oeste sofreu um leve aumento até o seu pico de 4,7°C às 22 h. Após este horário a ICU diminuiu de forma gradual no restante das horas.

Em contrapartida, as intensidades da ICU em relação aos pontos sul e leste, Figura 38b, comportaram-se de forma diferente dos pontos norte e oeste. Assim, a partir das 7 h, a intensidade da ICU em relação ao ponto sul diminuiu até às 9 h, atingindo seu valor mínimo diurno de 0,5°C. Depois aumentou de forma mais acentuada até às 15 h, atingindo 2,3°C. No caso da intensidade da ICU em relação ao ponto leste, houve uma diminuição das 7 h até as 11 h, registrando o mínimo diurno de 1°C e aumentando de forma gradual até às 14 h com 2°C.

À tarde observou-se um pico seguido de uma leve queda na intensidade da ICU em relação aos pontos leste e sul por volta das 16 h, como visto na Figura 38b. Este comportamento de aumento da intensidade da ICU pela manhã e começo da tarde seguido de queda poderia ser interpretado como resposta à influência da passagem da brisa do mar sobre as regiões dos pontos sul e leste. A brisa do mar vem de sudeste, alcançando os pontos sul e leste primeiro, que portanto sofrem influência mais direta devido às suas localizações, como no exemplo da Figura 37c, que mostra o efeito da passagem da brisa do mar em janeiro de 2014. Isto poderia ter causado o resfriamento nas regiões dos pontos sul e leste enquanto a região do ponto centro ainda não havia sofrido a influência da brisa do mar. Após a passagem da brisa pela região do ponto centro, a temperatura nessa região caiu também, diminuindo o contraste na intensidade da ICU em relação aos pontos sul e leste, o que explica a leve diminuição da intensidade da ICU às 16 h.

Observa-se na Figura 38b que, a partir das 16 h, a intensidade da ICU em relação aos pontos sul e leste aumentou nas horas seguintes de forma mais acentuada (entre 18 h e 19 h), horário em que o sol se pôs, em pelo menos 1,2°C. Às 19 h a intensidade da ICU em relação ao ponto sul atingiu seu pico diurno com 4,3°C e nas horas seguintes diminuiu. Já a intensidade da ICU em relação ao ponto leste registrou um leve aumento até o seu pico de 3,9°C às 23 h.

Com o pôr do sol, os raios solares cessam e as superfícies urbanas e rurais tendem a perder o calor recebido durante o período diurno a diferentes taxas. A área urbanizada sofreu resfriamento de forma mais lenta que a área rural, criando o contraste de temperatura e, conseqüentemente, uma ICU mais intensa surgiu no período noturno. Um exemplo da diferença na velocidade da queda de temperatura

no período noturno entre os diferentes pontos pode ser visto na Figura 34 para o caso de janeiro de 2014.

5.4.1.2 ICU típica – frente fria

Por ser um evento de grande escala, a frente fria traz uma massa de ar mais fria que atua por alguns dias, causando queda de temperatura na RMSP como um todo. Dessa forma, foi visto que, nos dias em que as condições atmosféricas são influenciadas pela passagem de frente fria, a intensidade da ICU foi suavizada e se mostrou menos intensa em comparação com as outras condições atmosféricas.

Assim, na figura 38c nota-se que, entre 0 h e 6 h, a intensidade da ICU em relação a todos os pontos sofre uma leve queda, semelhante à da ICU em dias de brisa do mar. Comportamento parecido ao caso de dias sob influência de brisa do mar também foi notado no horário entre às 6 h e 7 h. Com o nascer do sol, observou-se uma queda mais acentuada na intensidade da ICU em relação a todos os pontos, principalmente ao ponto leste.

A partir das 8 h, a intensidade da ICU em relação aos pontos norte e oeste continuou se comportando de forma semelhante ao que ocorreu nos dias de brisa do mar descrito na subseção anterior, como pode ser visto na Figura 38c. A intensidade da ICU em relação a estes pontos sofreu uma leve queda durante o restante do período da manhã. Após isto, observou-se uma interrupção da tendência com um leve aumento às 13 h e logo uma diminuição de mesma proporção às 14 h. Depois deste horário, a intensidade da ICU em relação aos pontos norte e oeste voltou a aumentar, principalmente entre às 17 h e 19 h. Após às 22 h, a intensidade da ICU em relação ao ponto oeste começou a cair, enquanto em relação ao ponto norte aumentou gradativamente até o final do dia.

Em contrapartida, pôde-se visualizar na Figura 38c que a intensidade da ICU em relação ao ponto sul e leste comportou-se de maneira diferenciada. No caso do ponto sul, a intensidade da ICU manteve-se praticamente estável entre 7 h e 9 h. Das 10 h até as 15 h observou-se um notável aumento de intensidade de aproximadamente 1,7 °C, aumentando até às 19 h quando atingiu seu pico, correspondente a 3,5°C. Nos horários posteriores a intensidade da ICU em relação ao sul diminuiu até o fim do dia. Dessa forma, ressalta-se que a intensidade da ICU em

relação ao ponto sul foi a que mais se destacou em todo o período da tarde para os demais pontos.

Já sobre a intensidade da ICU em relação ao ponto leste, notou-se uma queda até às 10 h e, na hora posterior, um aumento de forma mais acentuado até às 13 h equivalente a 1°C. Nas horas seguintes, a intensidade continuou a aumentar de forma gradual e às 17 h observou-se um aumento de forma acentuada que durou até às 19 h, semelhante aos comportamentos da ICU em relação aos pontos norte e oeste no mesmo horário. Por fim, a intensidade da ICU em relação ao ponto leste registrou queda até o término do dia.

5.4.1.3 Ilha de calor típica – dias sem frentes

Nos dias em que não foram identificadas a influência de frentes na RSMP, foi visto que os valores da intensidade da ICU destoaram de forma mais significativa entre os pontos. Apesar dos valores diferentes, o comportamento diurno da curva de intensidade da ICU foi semelhante entre os pontos.

Em dias sem frentes, na Figura 38d foi observado o mesmo padrão de comportamento dos casos de dias de influência de brisa do mar e dias de frente fria, com a diminuição gradual da intensidade da ICU entre 0 h e 6 h para todos os pontos. O padrão de diminuição mais acentuado na intensidade da ICU entre as 6 h e 7 h também foi observado nos dias sem frentes. Neste caso, as intensidades da ICU em relação aos pontos sul e leste foram os que mais se destacaram com queda de 1°C dentro deste intervalo de tempo.

Como observado na Figura 38d, após às 7 h a intensidade da ICU em relação aos pontos norte e oeste comportou-se de forma parecida, permanecendo quase sem alterações até às 13 h. Entre as 14 h e 15 h, a intensidade de ICU em relação a estes dois pontos aumentou ligeiramente e diminuíram no horário seguinte, este comportamento também foi visto no caso dos dias de frente fria de forma mais sutil no período da tarde. Nos horários seguintes, a intensidade da ICU em relação aos pontos norte e oeste aumentou de forma mais visível, principalmente entre as 18 h e 19 h, horário em que o sol se põe, como visto nos casos de dia de brisa do mar. Durante este período a intensidade da ICU atingiu seu pico diurno, no qual o ponto norte registrou 3,6°C e o oeste 4,2°C. Posteriormente, a intensidade da ICU em relação a estes dois pontos diminuiu gradualmente até o fim do dia.

Em comparação, a intensidade da ICU em relação aos pontos sul e leste apresentou uma diminuição até às 10 h para o sul, com mínima diurna de 0,4°C, e até às 12 h no caso do leste, com mínima diurna de 0,5°C. Durante o restante da manhã e toda a tarde, a intensidade da ICU em relação ao ponto sul cresceu de forma gradual até o intervalo entre 18 h e 19 h, quando observou-se um aumento mais acentuado, semelhante ao que ocorreu para os pontos norte e oeste, como visto na Figura 38d.

Na intensidade da ICU em relação ao ponto leste notou-se um aumento entre 12 h e 15 h. Depois manteve a mesma intensidade durante duas horas e, das 17 h até 19 h, aumentou novamente de forma mais marcante. Nas horas seguintes a intensidade da ICU em relação a região leste seguiu crescendo levemente.

5.4.1.4 ICU típica – total

No caso total, Figura 38a, em que a média da intensidade da ICU de todas as condições atmosféricas estão incluídas, foi possível notar semelhança de comportamento, principalmente com o caso dos dias de brisa do mar (Figura 38b). Isso ficou evidente especialmente ao se observar o comportamento da intensidade da ICU em relação aos pontos sul e leste, pois no intervalo entre as 13 h e 16 h notou-se a intensificação da ICU em relação a estes pontos, seguida por queda. O comportamento é típico de indicação da passagem da brisa do mar no período da tarde (Figura 38b). Isso sugere que a média total da ICU na RMSP é bastante influenciada pelo fenômeno da brisa do mar nos meses de janeiro.

Figura 38 – Intensidade da ICU típica

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Gráficos com médias diurnas da intensidade da ilha de calor calculadas a partir de dados de temperatura do ar próxima a superfície simulados para os meses de janeiro de 2004 a 2013 para: (a) todos os dias do mês, (b) somente dias sob influência de brisa do mar, (c) somente dias sob influência de frente fria e (d) somente dias sem influência de frentes. As linhas em vermelho representam a intensidade da ilha de calor em relação ao ponto norte, azul ao ponto sul, preto ao ponto oeste e verde ao ponto leste. O eixo x representa as horas e o eixo y mostra diferença de temperatura em Kelvin.

5.4.2 Comparação entre a ICU típica e atípica

Nesta subseção está apresentada a comparação entre a intensidade da ICU dos períodos típico, correspondente a média de janeiro de 2004 a 2013, e atípico, janeiro de 2014. Como no item anterior, a ICU dos diferentes períodos foi comparada separadamente, de acordo com a condição atmosférica predominante, exceto para

dias com passagem de frente fria em razão da ausência da influência deste fenômeno na RMSF em janeiro de 2014.

A partir de um ponto de vista geral, observou-se que para grande parte dos casos a intensidade da ICU atípica foi maior durante a noite e menor no período da manhã. Dessa forma, foi visto um padrão de comportamento diurno da ICU atípica semelhante ao da ICU típica, porém, com variações de temperatura mais acentuadas. Notou-se um padrão em que a intensidade da ICU atípica apresentou uma diminuição mais pronunciada do que a ICU típica durante a manhã, entre 6 h e 7 h, ao passo que, ao pôr do sol, entre 18 h e 19 h, observou-se um aumento da intensidade da ICU atípica mais acentuada que a ICU típica.

As variações mais acentuadas na intensidade da ICU atípica resultaram na ocorrência de uma ICU menos intensa durante o período diurno e mais intensa para período noturno, em comparação com o comportamento visto em relação à ICU típica.

5.4.2.1 Comparação entre ICU típica e atípica – brisa do mar

Similar ao que ocorreu no caso da ICU típica, os dias com condições atmosféricas predominantemente influenciadas pela brisa do mar foram os que registraram maior intensidade da ICU para o caso atípico também. Isto ficou claro principalmente à noite, como pode ser visto na Figura 39b.

Ao comparar o comportamento diurno da intensidade da ICU em dias de brisa do mar, na Figura 39b, observou-se que, entre 0 h e 6 h, as intensidades da ICU típica e atípica apresentaram comportamentos semelhantes. Entre às 7 h e 8 h a ICU típica tornou-se mais intensa, principalmente em relação aos pontos leste e oeste, em cerca de 0,5°C a mais que a ICU atípica.

Como no caso da ICU típica, a intensidade da ICU atípica em relação aos pontos norte e oeste mostraram comportamentos semelhantes, como observado na Figura 39b. Estes dois pontos registraram intensidade da ICU atípica menor que a ICU típica durante o restante da manhã e começo da tarde. Até que às 13 h foi possível notar um leve aumento de intensidade na ICU atípica, seguido de queda na hora seguinte, formando um pequeno pico de intensidade de ICU. Este padrão também foi observado para o caso da ICU típica, com a diferença de que esta pequena elevação na intensidade da ICU ocorreu uma hora mais tarde, às 14 h. No restante das horas o

padrão de comportamento e valores de intensidade da ICU em relação ao ponto norte e oeste apresentaram-se muito semelhantes entre os casos típico e atípico.

Já em relação à intensidade da ICU atípica para o ponto sul, foi visto que, entre 15 h e 18 h, a intensidade da ICU atípica tornou-se visivelmente mais intensa que a ICU típica, representada por uma curva de inclinação acentuada. Diferentemente, no caso da ICU típica neste mesmo intervalo, observou-se a formação de um leve pico, indicando a influência da passagem da frente de brisa do mar. No caso da ICU atípica, este pico característico da influência da passagem da frente da brisa do mar não ficou claro na Figura 39b.

Entre 18 h e 19 h foi possível observar o aumento da intensidade da ICU atípica de forma acentuada, semelhante ao comportamento visto no caso da ICU típica, porém de forma mais intensa, no qual se constatou um pico na intensidade da ICU de mais de 5°C às 19 h para o ponto sul. Nas horas seguintes do período noturno, as intensidades da ICU atípica para os pontos sul e leste foram visivelmente mais intensas que a ICU típica, apesar de apresentarem comportamentos parecidos.

5.4.2.2 Comparação entre ICU típica e atípica – dias sem frentes

Por meio da Figura 39c observou-se que os dias sem frentes foram os que mais resultaram em diferenças de valores entre a intensidade da ICU típica e atípica, principalmente de manhã, período em que a intensidade da ICU atípica foi até 2,3°C menor que a ICU típica. Em relação a outros horários, observou-se que a ICU atípica também foi menos intensa que a ICU típica, exceto nas primeiras horas do período noturno.

De forma mais detalhada, na Figura 39c foi possível notar que a taxa de queda da intensidade da ICU atípica apresentou-se bem mais acentuada que a da ICU típica entre as 6 h e 7h. Isto fez com que, às 8 h, a intensidade da ICU atípica fosse consideravelmente mais baixa, sendo que a ICU em relação ao ponto oeste chegou ao valor zero. Neste mesmo horário ocorreram episódios de *urban cool island* em relação a intensidade da ICU atípica dos pontos sul e leste, com pico negativo às 8 h, horário em que se registrou aproximadamente -1°C. Excepcionalmente para o ponto norte, a intensidade da ICU atípica mínima ocorreu às 7 h, uma hora antes em relação aos demais pontos registrando ICU nula.

Dessa forma, entre 7 h e 8 h foi o período em que a intensidade da ICU atípica chegou a menores valores para todos os pontos. Além disso, foram as horas em que mais ocorreram diferenças nos valores entre ICU atípica e típica.

A partir das 8 h a intensidade da ICU atípica começou a aumentar em relação a todos os pontos, ocorrendo de duas a quatro horas antes em relação aos pontos da intensidade da ICU da típica. Além de adiantada no tempo, o aumento da intensidade da ICU se deu de forma muito mais pronunciada, principalmente para os pontos norte e oeste, com aumento de 1°C entre 8 h e 9 h, como visto na Figura 39c.

Durante o período da tarde a intensidade da ICU atípica foi menor que a ICU típica para todos os pontos.

Entre às 18 h e 19 h a intensidade da ICU atípica aumentou de forma pronunciada, em cerca de 2°C para todos os pontos, apresentando um aumento consideravelmente maior em relação a ICU típica durante o mesmo período. Neste mesmo intervalo de tempo a intensidade da ICU atípica tornou-se maior que a ICU típica em relação a todos os pontos, em cerca de 0,5°C, exceto para a ICU atípica em relação ao ponto oeste, que, apesar de ultrapassar a ICU típica em relação ao mesmo ponto, apresentou diferenças menores.

No restante dos horários do período noturno, na Figura 39c, apesar da intensidade maior, a ICU atípica comportou-se de forma semelhante à ICU típica, exceto para o ponto sul, que sofreu um aumento ao invés de uma diminuição.

5.4.2.3 Comparação entre ICU típica e atípica – total

Como no caso da ICU típica a média da intensidade da ICU atípica total, (Figura 39a) mostrou comportamento e valores semelhantes à ICU obtida em dias de influência predominante da brisa do mar, mas também foram encontradas características da ICU atípica de dias sem frentes no período da manhã. Isto tornou-se evidente com os baixos valores da intensidade da ICU atípica entre 6 h e 12 h que foram característicos dos dias sem frentes.

Ao comparar a intensidade da ICU atípica total com a ICU típica total na Figura 39^a, observou-se que ambas foram semelhantes entre às 0 h até 6 h, quando a ICU atípica apresentou-se ligeiramente maior. Com o nascer do sol, entre 6 h e 7 h, os valores permaneceram parecidos, porém foi possível notar que neste período a

intensidade da ICU atípica sofreu maior queda que a ICU típica. Dessa forma, durante a manhã a intensidade da ICU atípica foi menor que a da ICU típica.

No período da tarde os valores tornaram-se mais próximos entre as ICU atípica e típica (Figura 39a) exceto em relação ao ponto sul. Das 15 h às 18 h, a intensidade da ICU atípica em relação ao ponto sul mostrou-se mais intensa que o mesmo ponto para a ICU típica em quase 1°C.

Após às 19 h a intensidade da ICU atípica e típica diminuíram. Os valores para ambas no caso dos pontos norte e oeste foram muito semelhantes, enquanto para os pontos sul e leste a intensidade da ICU para o caso atípico foi maior, principalmente em relação ao sul, com cerca de 1°C de diferença (Figura 39a).

Visto isto, notou-se que, no total dos dias de janeiro, a ICU atípica foi semelhante à ICU típica no período da madrugada e da tarde, enquanto as maiores diferenças foram encontradas no período da manhã depois do nascer do sol, quando a ICU atípica foi menos intensa, e à noite após ao pôr do sol, quando a ICU atípica foi mais intensa.

O Quadro 2 apresenta de forma resumida os principais resultados da subseção 5.4 sobre o comportamento da intensidade da ICU em diferentes condições atmosféricas.

Quadro 2 – Intensidade da ilha de calor urbana em diferentes condições atmosféricas

Classificação de dias com diferentes condições atmosféricas	Intensidade da ICU no período típico (média dos meses de janeiro entre 2004 a 2013)	Intensidade da ICU no período atípico (média de janeiro de 2014)
Brisa do mar	<ul style="list-style-type: none"> • Maior amplitude de variação na intensidade da ICU em comparação com os dias de condições atmosféricas diferentes (ICU menos intensa de manhã e mais intensa à noite); • Pico na intensidade da ICU à tarde no ponto sul devido à influência da brisa do mar. 	<p>Comportamento semelhante à ICU do período típico, com as seguintes diferenças:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amplitude de variação na intensidade da ICU maior que a ICU típica (ICU menos intensa de manhã e mais intensa à noite que no período típico); • Intensidade da ICU para o ponto sul mais acentuado à tarde em comparação ao período típico.
Frente fria	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidade da ICU suavizada em comparação com os dias de condições atmosféricas diferentes; • Pico na intensidade da ICU à tarde para o ponto sul. 	-
Sem frentes	<ul style="list-style-type: none"> • Situação em que os valores na intensidade da ICU mais destoaram entre os pontos. 	<p>Comportamento semelhante à ICU do período típico com as seguintes diferenças:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variações na intensidade da ICU mais acentuadas de manhã e à noite em comparação com o período típico (ICU menos intensa de manhã e mais intensa à noite que no período típico); • Ocorrência de <i>urban cool island</i> para alguns pontos.
Total	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamento da intensidade da ICU semelhante aos dias de brisa do mar. 	<p>Comportamento semelhante à ICU do período típico com as seguintes diferenças:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amplitude de variação na intensidade da ICU maior que a ICU típica (ICU menos intensa de manhã e mais intensa à noite que no período típico).

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Figura 39 – Comparação entre a intensidade da ICU típica e atípica

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Gráficos com médias diurnas da intensidade da ilha de calor calculadas a partir de dados de temperatura do ar próxima a superfície simulados para os meses de janeiro de 2004 a 2013, em linhas sólidas, e em 2014, em linhas tracejadas, para: (a) todos os dias do mês, (b) somente dias sob influência de brisa do mar e (c) somente dias sem influência de frentes. As linhas em vermelho representam a intensidade da ilha de calor em relação ao ponto norte, azul ao ponto sul, preto ao ponto oeste e verde ao ponto leste. O eixo x representa as horas e o eixo y mostra diferença de temperatura em Kelvin.

5.5 BALANÇO DE ENERGIA

A fim de auxiliar na análise da ICU na RMSP, foram gerados gráficos com o balanço de energia da região a partir de simulações apresentados na Figura 40. Para cada ponto deste estudo foi originado um gráfico com o balanço de energia horário do

período considerado típico, representado por linhas contínuas, e do período atípico, em linhas tracejadas, assim, o balanço de energia dos dois períodos foram comparados.

De forma geral, foi visto que as proporções do fluxo de energia entre as componentes do balanço de energia entre os períodos considerados típico e atípico, mostraram maiores diferenças nos horários próximos às 12 h, correspondente ao período do dia com maiores valores. Maiores valores das componentes do balanço de energia ocorreram no período diurno, quando há a presença de raios solares. No período noturno, com a ausência de radiação solar, as componentes do balanço de energia permaneceram consideravelmente mais baixas em comparação com o período diurno. Nas próximas subseções estão descritos o comportamento diurno de cada componente do balanço de energia separados por período diurno, horário entre 6 h e 18 h, e período noturno, horário entre 19 h e 5 h.

Por fim, ainda é importante esclarecer que na Figura 40 o sinal da variação do calor armazenado é positivo quando indica aumento de calor armazenado no dossel urbano. Já o sinal negativo indica uma variação de diminuição do calor armazenado no dossel urbano, ou seja, perde calor para a atmosfera.

5.5.1 Balanço de energia no período diurno

Na Figura 40, foi possível notar que o pico de Q^* , correspondente ao fluxo de radiação líquida, ocorreu entre às 12 h e 13 h para os pontos analisados variando pouco entre si. As maiores diferenças ocorreram em comparação entre os períodos típico e atípico, na qual as médias de Q^* em janeiro de 2014 foram maiores que a média entre janeiros de 2004 a 2013 para todos os pontos. O valor de Q^* do período atípico foi cerca de 140 W.m^{-2} maior que a média considerada típica no horário do pico.

No que concerne ao Q_E , fluxo de calor latente, o pico ocorreu entre às 13 h e 14 h com o comportamento oposto do descrito acima. As diferenças de Q_E não foram grandes entre os períodos típico e atípico, entretanto, diferenças acentuadas foram observadas entre os diferentes pontos do estudo. Isto foi significativamente expressivo em relação ao ponto centro que apresentou Q_E notavelmente mais baixo, com cerca de 20 W.m^{-2} , tanto para o período típico quanto para o período atípico no horário do pico. Quanto aos valores de Q_E nos demais pontos, variaram entre 200 W.m^{-2} e 420

W.m^{-2} considerando ambos os períodos no horário do pico, sendo o ponto norte com maior quantidade de Q_E .

Dessa forma, a quantidade de Q_E parece ser um indicador da influência da umidade na temperatura do ar próximo à superfície na RMSP. A ocorrência de temperaturas maiores no ponto centro poderia ser explicada pela menor disponibilidade de água no ambiente urbano, devido a fatores como a impermeabilização do solo que resulta em menor quantidade de Q_E . Nos pontos rurais, a presença da vegetação permitiu que houvesse maior umidade do ar e maior quantidade de Q_E fazendo com que a temperatura não se elevasse tanto como na área urbanizada.

Em relação a Q_H , fluxo de calor sensível, com pico entre 12 h e 13 h, foi visto que o período atípico apresentou maiores valores que o período típico, com diferenças de 60 W.m^{-2} a 170 W.m^{-2} nos pontos rurais no horário do pico. O ponto centro foi o único que não apresentou diferenças na quantidade de Q_H entre os períodos típico e atípico.

Tipicamente, áreas urbanizadas tendem a apresentar maiores valores de Q_H que em áreas rurais devido a menor quantidade de umidade neste ambiente. Esta menor disponibilidade de água no ambiente urbano pode favorecer o aumento da temperatura do ar próximo à superfície, situação vista para o caso do período típico. No período atípico foram vistos maiores valores de Q_H que o período típico nos pontos rurais, provavelmente em razão de janeiro de 2014 ter sido mais seco que a média, diminuindo a disponibilidade de água para evaporação.

Uma observação interessante foi a ocorrência do maior valor de Q_H no ponto centro durante o período típico, enquanto no período atípico o maior valor de Q_H ocorreu no ponto sul, correspondente a 450 W.m^{-2} no horário do pico, ultrapassando o ponto centro que tipicamente possui maiores valores de Q_H . Essa diferença pode ter relação com a passagem da brisa marítima, que traz um ar mais frio sobre uma superfície quente, o que aumenta o Q_H .

Quanto ao ΔQ_s , armazenamento de calor, apresentou pico entre 11 h e 12 h, no qual os valores não variaram muito entre os períodos típico e atípico nos pontos rurais. Para o ponto centro, ΔQ_s foi cerca de 100 W.m^{-2} maior em janeiro de 2014, comparado ao período considerado típico no pico diurno.

Não foram encontradas grandes diferenças de ΔQ_s entre os pontos localizados nos pontos norte, sul, leste e oeste, para ambos os períodos. Porém, foram vistas

grandes diferenças de ΔQ_s entre os pontos rurais e o ponto centro. Notou-se que o ΔQ_s do ponto centro foi cerca de 130 W.m^{-2} maior no período típico e 250 W.m^{-2} maior no período atípico, em comparação aos pontos rurais no horário do pico.

Maiores valores de ΔQ_s em áreas urbanizadas estão relacionados às características do ambiente urbano, que ao receber os raios solares tendem a armazenar mais calor.

5.5.2. Balanço de energia no período noturno

Em relação às componentes do balanço de energia no período noturno (Figura 40) o Q^* foi igual para os períodos típico e atípico, exceto pelo ponto norte que foi ligeiramente maior em 2014. Também não foram vistas grandes diferenças entre os pontos nem para os dois períodos analisados.

No tocante ao Q_E o valor foi próximo de zero para todos os pontos e períodos. Já em relação ao Q_H também se observou valor próximo de zero para os pontos sul, leste e oeste para ambos os períodos típico e atípico. No ponto centro foi visto um pico noturno de Q_H de 70 W.m^{-2} para o período típico e 40 W.m^{-2} para o período atípico, enquanto no ponto norte ocorreram valores negativos de Q_H para os períodos típico e atípico, correspondentes a aproximadamente -20 W.m^{-2} , indicando o sentido do fluxo de calor da atmosfera para a superfície.

Enfim, o ΔQ_s não apresentou diferenças entre os períodos típico e atípico para os pontos norte, sul, leste e oeste. Somente para o ponto centro observou-se que o ΔQ_s foi cerca de 50 W.m^{-2} menor no período atípico em comparação com o período típico no pico noturno. Isto poderia indicar que o dossel urbano perdeu menor quantidade de calor em 2014 que no período considerado típico, permanecendo com mais ΔQ_s no dossel urbano.

O ponto centro possui a superfície composta por materiais que tendem a armazenar mais calor dos raios solares durante o dia e tendem a transferir este calor para a atmosfera durante a noite. Em razão disto o ΔQ_s aparentou exercer maior importância principalmente no período noturno quando o fluxo de transferência de calor passou a ser do dossel urbano para a atmosfera. Esta transferência de calor mais significativa em áreas urbanizadas fez com que a temperatura do ar próximo à superfície subisse, criando um contraste de temperatura com as áreas rurais. Isto

sugere que a quantidade de ΔQ_s tem importância significativa para a formação da ICU noturna na RMSP.

O Quadro 3 mostra de forma resumida os principais resultados do balanço de energia que foram apresentados nesta subseção.

Quadro 3 – Balanço de energia na RMSP

Componentes do balanço de energia	Período típico (média dos meses de janeiro entre 2004 a 2013)	Período atípico (média de janeiro de 2014)
Fluxo de radiação líquida (Q^*)	<ul style="list-style-type: none"> Pouca variação entre os diferentes pontos tanto no período diurno quanto no noturno. 	Comportamento semelhante ao período típico, com as seguintes diferenças: <ul style="list-style-type: none"> Q^* foi cerca de 140 W.m^{-2} maior no pico do período diurno em comparação com o período típico para todos os pontos.
Fluxo de calor latente (Q_E)	<ul style="list-style-type: none"> Maiores de Q_E nos pontos rurais (entre 200 e 420 W.m^{-2}) em comparação com o ponto centro (20 W.m^{-2}) no pico diurno. 	Comportamento semelhante ao período típico.
Fluxo de calor sensível (Q_H)	<ul style="list-style-type: none"> Maiores valores de Q_H no ponto centro (350 W.m^{-2}) em comparação com os pontos rurais (entre 150 W.m^{-2} e 270 W.m^{-2}) no pico diurno; No pico noturno somente no ponto centro houve valor considerável de Q_H (70 W.m^{-2}). 	<ul style="list-style-type: none"> Q_H no ponto centro foi semelhante para os períodos típico e atípico; Q_H nos pontos rurais foi cerca de 60 a 170 W.m^{-2} maior no pico do período diurno em comparação com o período típico para os pontos rurais; Q_H no pico diurno do ponto sul foi expressivamente maior no período atípico (450 W.m^{-2}); No pico noturno Q_H foi menor (40 W.m^{-2}) em comparação com ponto centro no período típico.
Calor armazenado (ΔQ_s)	<ul style="list-style-type: none"> Maiores valores de ΔQ_s no ponto centro em comparação com os pontos rurais tanto no período diurno quanto no noturno. 	Comportamento semelhante ao período típico, com as seguintes diferenças: <ul style="list-style-type: none"> ΔQ_s no período atípico foi cerca de 100 W.m^{-2} maior no pico diurno e 50 W.m^{-2} menor no pico noturno comparado ao período típico.

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Figura 40 – Evolução diurna do balanço de energia simulado para a RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Evolução diurna do balanço de energia na RMSP simulada para o mês de janeiro no: (a) ponto norte; (b) ponto sul; (c) ponto leste; (d) ponto oeste; e (e) ponto centro. As linhas contínuas representam médias dos meses de janeiro dos anos de 2004 a 2013 e as linhas tracejadas representam médias do mês de janeiro de 2014.

5.6 CORTE VERTICAL DA ATMOSFERA NA RMSP

A fim de analisar o efeito da urbanização na circulação atmosférica da RMSP, foram realizadas simulações do perfil vertical da região sentido sul – norte, sentido da esquerda para a direita na Figura 41. O dia 02 de janeiro de 2014 foi escolhido para a análise por ter sido classificado como sem frentes apresentando condições de ventos calmos.

Para isso, foram considerados dois cenários: (a) cenário real, incluindo a urbanização existente na RMSP, e (b) cenário sem a urbanização. A partir das diferenças encontradas entre os dois cenários, foi gerada a Figura 41 com valores de: altura da camada limite planetária medida a partir da superfície em km, diferença de temperatura do ar representada pela escala de cores em °C e diferença da intensidade do vento sinalizada pelo tamanho das setas em diferentes horários.

Em análise ao comportamento diurno do perfil vertical da atmosfera, a Figura 41a apresenta o perfil da atmosfera à 1 h, sendo que a altura da camada limite está representada por uma linha contínua azul para o cenário real e em uma linha pontilhada em verde para o cenário sem a urbanização. Neste horário observou-se que a altura da camada limite estava pouco desenvolvida devido à ausência de aquecimento da superfície pela luz solar. Foi possível notar que a altura da camada limite para o cenário sem urbanização teve comportamento mais uniforme sobre a RMSP enquanto a camada limite do cenário real comportou-se de forma desigual, principalmente sobre a região central mais urbanizada. Neste cenário a altura da camada limite seguiu um padrão de picos e quedas de forma sequenciada, além disso, sua altura nos momentos de pico apresentaram o dobro da altura vista na camada limite do cenário sem urbanização. Este comportamento diferenciado se dá pela heterogeneidade das classes de cobertura do solo no cenário real. O modelo calcula alturas diferentes da camada limite para as diferentes classes de cobertura, mesmo que sejam urbanas. A altura da camada limite foi influenciada por este padrão e sua altura tornou-se irregular.

Nos horários seguintes o mesmo padrão foi mantido, até que às 7 h, na Figura 41b, a camada limite dos cenários real e sem urbanização tornaram-se semelhantes e uniformes. Caso similar também aconteceu para a temperatura do ar, pois, o cenário real mostrou-se semelhante ao cenário sem urbanização, sendo somente um pouco mais quente. O horário das 7 h foi o mesmo encontrado em que a intensidade da ICU

registrou diminuição mais acentuada, como visto na Figura 39. Este comportamento poderia indicar que o ambiente urbano leva mais tempo para aquecer em comparação com o ambiente rural após o recebimento dos primeiros raios solares.

Durante o restante da manhã e tarde, a altura da camada limite para os dois cenários cresceu de forma semelhante até atingir 2,75 km de altura acima do nível do mar às 16 h (Figura 41c). No horário seguinte, às 17 h (Figura 41d), a altura da camada limite começou a diminuir, sendo que a camada limite do cenário sem urbanização apresentou-se ligeiramente menor que a do cenário real. Esta diferença de altura tornou-se mais evidenciada nas próximas horas, até que às 19 h (Figura 41e) observou-se regiões na parte central da RMSP em que a camada limite do cenário real mostrou-se até 1 km mais alta que a do cenário sem urbanização. Além disso, a camada limite deixou de ter um padrão uniformizado e passou a ter o padrão de picos seguidos de quedas semelhante ao encontrado de madrugada, porém, com a camada limite mais alta. Também durante este horário sugeriram diferenças de temperatura do ar próximo a superfície de forma mais visível.

Após às 19 h, o padrão de queda da altura da camada limite e aumento da diferença da temperatura do ar próxima a superfície seguiu se intensificando. Às 21 h (Figura 41f), a diferença de temperatura entre os cenários real e sem urbanização mostrou maiores contrastes. Ao mesmo tempo a altura da camada limite do cenário real permanecia alta, com o padrão de picos seguidos de quedas, diferentemente da do cenário sem urbanização, que se apresentou mais baixa e de padrão uniforme. Este comportamento poderia indicar que o efeito da urbanização tende a manter a altura da camada limite mais alta por mais tempo, pois apresenta decaimento a taxas mais lentas que o encontrado no ambiente sem urbanização.

Enfim, nos horários seguintes, a altura da camada limite seguiu o padrão de queda e as diferenças de temperatura do ar próximo à superfície entre os cenários real e sem urbanização diminuíram até o final do dia. Assim, observou-se que a urbanização fez com que a altura da camada limite fosse em geral mais alta que no ambiente não urbanizado. Além disso, o campo de temperatura do ar próximo a superfície permaneceu mais elevado no ambiente urbanizado na RMSP, principalmente no período noturno, pois aparentou ter o processo de perda de calor mais lento que o ambiente não urbanizado.

Por fim, pôde-se observar uma relação entre a altura da camada limite e a intensidade da ICU: quanto menor a altura da camada limite, maior a intensidade da ICU.

Figura 41 – Corte vertical da RMSP

Fonte: Arissa Sary Umezaki, 2020

Corte vertical da Região Metropolitana de São Paulo sentido sul – norte, da esquerda para a direita, simuladas para o cenário real e o cenário sem urbanização no dia 02 de janeiro de 2014, no qual: (a) representa condições atmosféricas às 01 h, (b) às 07 h, (c) às 16 h, (d) às 17 h, (e) às 19 h e (f) às 21h. A linha em azul representa a altura da camada limite considerando o cenário real e a linha verde tracejada representa a altura da camada limite do cenário sem urbanização. As diferentes escalas de cores representam a diferença de temperatura do ar em °C e as setas representam a diferença de intensidade do vento, na qual, o valor de referência é 4 m/s. As diferenças foram calculadas subtraindo os valores do cenário real dos valores do cenário sem a urbanização. Os eixos x e y representam a latitude e altura em km em relação ao nível do mar, respectivamente. Os símbolos em “X” na base de cada imagem representa a parte urbanizada do terreno.

6 DISCUSSÃO

Nesta sessão são discutidos os resultados encontrados no presente estudo com base na literatura acessada. Primeiro, é apresentada a discussão do comportamento da ICU típica, representada pela média dos meses de janeiro dos anos de 2004 a 2013. Após isso, encontra-se o comportamento da ICU atípica, correspondente a janeiro de 2014, traçando uma comparação com a ICU típica. Além disso, foram também discutidos o balanço de energia de superfície e o comportamento da ICU sob diferentes condições atmosféricas de ambos os períodos.

6.1 INTENSIDADE DA ICU TÍPICA

Ainda que em intensidades diferentes, de forma geral, a ICU considerada típica apresentou comportamento diurno semelhante para todos os casos de condições atmosféricas enquadrados neste estudo, correspondentes a: dias sob maior influência da brisa do mar, dias com frente fria, dias sem frentes e total.

Observou-se que a intensidade da ICU foi maior durante o período noturno e mínima durante a manhã. Isto ocorreu devido a um rápido aumento da intensidade da ICU em horário próximo ao pôr do sol, entre 18 h e 19 h, fazendo com que a intensidade permanecesse maior durante toda a noite e madrugada. Já a queda de intensidade mais acentuada entre 6 h e 7 h resultou em uma intensidade da ICU mínima entre às 8 h e 9.

Padrão semelhante foi visto em estudo da ICU de Chicago, em que maiores variações de temperatura ocorreram perto do nascer e pôr do sol causadas pelas diferentes taxas de aquecimento e resfriamento entre as superfícies urbana e rural. Assim, a superfície urbana, ao começar a receber ou deixar de receber os raios solares, mostrou responder termicamente de forma mais lenta que a rural, sendo fortemente influenciada pela radiação solar (ACKERMAN, 1985).

Outros estudos também indicaram que a ICU sofre uma rápida diminuição de intensidade logo após o nascer do sol. A queda na intensidade da ICU chegou a resultar para alguns casos no surgimento de *urban cool island*, situação inversa à ICU, em que o ambiente rural apresenta temperaturas mais elevadas que o ambiente urbano (CHOW; ROTH, 2006; FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013; LI; NORFORD, 2016).

Esta diferença na resposta térmica entre os dois ambientes pode ser explicada pelos diferentes valores de admitância térmica entre o ambiente urbano e rural (OKE, 1982; CHOW; ROTH, 2006; FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013; LI; NORFORD, 2016). O ambiente urbano possui maior valor de admitância térmica que o rural, portanto necessita de mais energia para sofrer mudanças em sua temperatura em comparação com o ambiente rural (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013).

Além disso, o sombreamento causado pelas altas construções das áreas mais urbanizadas durante a manhã também foi colocado como um contribuinte para as diferentes respostas térmicas entre o ambiente urbano e rural (OKE, 1982; CHOW; ROTH, 2006; LI; NORFORD, 2016).

Outro fator para a geração deste padrão de comportamento foi relacionado à altura da camada limite, pois foi vista uma relação oposta entre esta e a intensidade da ICU. Esta relação foi investigada por outros estudos em que foi observado que à medida que a altura da camada limite diminui, o volume de ar disponível sobre a cidade para ser aquecido também diminui, ao passo que a temperatura aumenta no local (OKE, 1982; HIDALGO; MASSON; GIMENO, 2010). Dessa forma, a camada limite de manhã encontra-se pouco desenvolvida, favorecendo a transferência de calor por condução em detrimento da convecção (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013).

Em razão disto, durante a manhã, quando a camada limite ainda é pouco desenvolvida, o ar próximo à superfície é aquecido mais rapidamente. No ambiente rural, em que a camada limite costuma se encontrar em altura mais baixa que a urbana, o aumento da temperatura é favorecido em comparação ao ambiente urbano. Isto fez com que a temperatura do ar próximo à superfície em áreas rurais aumentasse de forma mais rápida durante a manhã e a intensidade da ICU diminuísse.

Já a ICU mais intensa durante o período noturno também foi vista em estudos observacionais e por meio de modelagem. A diferença térmica entre o ambiente urbano e rural foi evidente principalmente próximo ao horário do pôr do sol e início da noite, quando a intensidade da ICU aumentou de forma rápida (ACKERMAN, 1985 LI; CHOW; ROTH, 2006; MURPHY et al., 2011; GIANNAROS et al., 2013; RIBEIRO et al., 2015; NORFORD, 2016;)

Esta diferença térmica acentuada no período noturno entre ambiente urbano e rural poderia ser justificada pelas diferentes coberturas de solo dos dois locais. Um estudo mostrou que, apesar da grande quantidade de radiação líquida absorvida

durante o dia, foi visto que o solo não pavimentado perdeu calor rapidamente durante o começo da noite. Diferentemente, além de ter absorvido maior quantidade de radiação líquida durante o dia, o solo asfaltado teve esta energia conduzida e armazenada a níveis mais profundos do solo. À noite a energia armazenada foi liberada para a atmosfera fazendo com que a superfície asfaltada permanecesse com temperaturas mais elevadas que a temperatura do ar próximo à superfície (ASAEDA; VU, 1993).

Dessa forma, a ICU noturna mais intensa poderia ser explicada devido ao fato de a superfície do ambiente urbano ser constituída de materiais que favorecem o armazenamento do calor adquirido dos raios solares durante o período diurno. Além disso, o ambiente urbanizado tem o seu dossel obstruído por construções mais altas, fazendo com que a transferência de calor para a atmosfera acima do dossel urbano fique dificultada. Isto faz com que o calor do dossel urbano seja perdido a menores taxas e tenha o resfriamento retardado em comparação com o ambiente rural, contribuindo para a intensificação da ICU (OKE, 1982; MURPHY et al., 2011).

Além do efeito da geometria das construções e cobertura do solo, a maior intensidade da ICU à noite poderia receber contribuição do efeito da camada limite planetária mais baixa e estável no período noturno que favorece o aumento de temperatura (WANG et al., 2017).

6.1.1 Balanço de energia - período típico

A temperatura do ar próximo à superfície de uma região é consideravelmente influenciada pelo seu balanço de energia de superfície, sendo importante para explicar diferenças de temperatura entre ambiente urbano e rural.

Um estudo feito para uma cidade hipotética de média latitude por meio de simulações apontou três principais contribuidores para a intensificação da ICU. Foi visto que, durante o período diurno, as superfícies impermeáveis foram as maiores contribuidoras para o aumento da intensidade da ICU devido a menores taxas de evapotranspiração. O segundo fator apontado foi o calor antropogênico e o terceiro foi a geometria urbana. Esta última mostrou-se negativamente relacionada ao aumento da intensidade da ICU, devido ao sombreamento causado pelas construções mais altas nos centros urbanos. (RYU; BAIK, 2012).

Durante a noite, o calor antropogênico foi apontado como primeiro contribuinte para o aumento da intensidade da ICU, seguido pela impermeabilização da superfície e geometria urbana. Neste último fator, o calor armazenado nas paredes das construções mostrou-se importante, pois à noite este calor é liberado para a atmosfera, e as construções apresentam maiores obstáculos para que o calor deixe o dossel urbano (RYU; BAIK, 2012).

Nas regiões de alta e média latitudes, o calor antropogênico mostrou ser um importante contribuinte para a intensificação da ICU, diferentemente das localizadas em baixas latitudes, como o caso do Brasil.

Para a RMSP, foi visto que o fluxo de calor antropogênico representa somente 9% do fluxo de radiação líquida no verão e 15% no inverno. Com isto, apesar de contribuir, não aparenta ser um fator dominante para a ICU na região (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2011). Porém, os fatores de impermeabilização do ambiente urbano e sua geometria destacados por Ryu e Baik (2012) aparentaram ter tido influência significativa na intensidade da ICU na RMSP, refletindo nos valores de calor armazenado, calor sensível e calor latente.

6.1.1.1 Fluxo de calor latente – período típico

A cobertura de solo, especialmente pela densidade de área construída e quantidade de vegetação em um local, tem influência significativa na quantidade de umidade presente. Isto faz com que a temperatura do ar próximo à superfície no ambiente urbano e rural sejam diferentes, influenciando na magnitude da ICU (CARDOSO et al., 2017).

Na RMSP, foi visto, por meio dos valores da componente de fluxo de calor latente, que o ambiente urbano se mostrou muito mais seco em comparação com o rural. Em resposta à maior área de superfície impermeabilizada e pouca vegetação, foi visto que fluxo de calor latente no ponto centro foi próximo de zero enquanto nos pontos norte, sul, leste e oeste situou-se em torno de 300 a 400 W.m⁻². O fluxo de calor latente nas cidades pode ser relacionado com temperaturas mais amenas, pois transfere-se o calor da superfície para a atmosfera por meio de evaporação e não pelo aumento de temperatura do ar.

Analisando os diferentes tipos de cobertura do solo, foi visto que em solos não pavimentados a radiação líquida que chegou à sua superfície foi usada para

evaporação da água contida no seu interior. Neste caso, o calor foi perdido para a atmosfera por meio do fluxo de calor latente. Isto fez com que o fluxo de calor não fosse conduzido e armazenado a níveis muito profundos do solo, comparado ao solo asfaltado. Assim, a menor temperatura do solo não pavimentado foi explicada pela sua maior umidade. (ASAEDA; VU, 1993).

Visto isto, diferenças de disponibilidade de água causadas pela cobertura de superfície e quantidade de vegetação entre o ambiente urbano e rural na RMSP podem ter influenciado fortemente a intensidade da ICU.

6.1.1.2 Fluxo de calor sensível – período típico

Valores da componente de fluxo de calor sensível no ponto centro indicaram um ambiente urbanizado muito mais quente em relação ao rural na RMSP. Isto se justifica pela quantidade de fluxo de calor sensível vista no ponto urbano ser correspondente ao dobro em comparação com os pontos em áreas rurais.

A maior quantidade de fluxo de calor sensível coincidiu com os maiores valores de temperatura do ar próximo à superfície na área urbanizada da RMSP. Dessa forma, os resultados encontrados corroboram com resultados de outros estudos, nos quais a área urbana apresentou mais calor sensível e menos evaporação que a área rural, causando a elevação da temperatura nas cidades (HILDEBRAND; ACKERMAN, 1984; FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013).

Inclusive, durante o período noturno, o fluxo de calor sensível continuou positivo no ponto urbano. Isto indicou que, mesmo na ausência dos raios solares, a temperatura na superfície continua mais elevada em relação à da atmosfera na área urbana. O fluxo de calor sensível positivo durante à noite, ainda que menor que o do período diurno, também foi visto em estudo feito por meio de simulações para outras áreas urbanas (RYU; BAIK, 2012).

6.1.1.3 Calor armazenado – período típico

Em relação aos valores simulados de calor armazenado, foi visto que o seu pico ocorreu um pouco antes das 12 h. Destaca-se o ponto centro, que teve maior parte da radiação líquida convertida em calor armazenado em comparação ao visto nos pontos rurais.

Devido à maior transferência de calor para o solo no período com luz solar, durante o horário do pôr do sol o sentido do se inverteu e valores de calor armazenado sendo liberado para a atmosfera passaram a ser vistos de forma mais acentuada para o ponto centro.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudo por meio de simulações feita para a cidade de São Paulo, em que o pico do calor armazenado ocorreu por volta das 12 h. Em horário próximo ao pôr do sol também se observou maior perda de calor armazenado para a atmosfera, que por sua vez, manteve este padrão, com redução de forma gradual, até o nascer do sol (FERREIRA; OLIVEIRA; SOARES, 2013).

Por meio disto, pôde-se notar que a liberação do calor armazenado no dossel urbano foi importante para a elevação da temperatura do ar próxima à superfície e formação de uma ICU noturna mais intensa na RMSP, corroborando com os resultados de temperatura do ar noturna discutidos na subseção anterior.

6.1.2 Intensidade da ICU típica em diferentes condições atmosféricas

Nas subseções antecedentes a esta foi discutido o padrão de comportamento geral da intensidade da ICU típica. Na presente subseção é discutido o comportamento da intensidade da ICU típica diferenciada pela situação atmosférica predominante, classificadas neste estudo como: dias sob influência de brisa do mar, dia de frente fria, dia sem frentes e total.

6.1.2.1 Brisa do mar – período típico

Em dias sob maior influência da brisa do mar, a intensidade da ICU mostrou comportamento mais variável devido à passagem do ar mais frio e úmido do oceano que contrasta com o ar continental quente e seco na RMSP.

O efeito da brisa foi mais claro ao observar o comportamento da intensidade da ICU em relação aos pontos leste e sul, que captaram os efeitos de contraste do ar entre a região continental e marinha por questões de localização. A brisa do mar vem de sudeste, atingindo primeiramente a região sul e leste e, assim, um pico na intensidade da ICU pôde ser visualizado no período da tarde, indicando a passagem da frente de brisa por esses pontos.

Em estudo conduzido na RMSP, a chegada da frente de brisa a uma estação rural localizada ao sul da região ocorreu entre 13 h e 14 h, causando o efeito de intensificação da ICU em relação à região central, que ainda não havia sofrido com a influência de sua passagem (RIBEIRO et al., 2018). A maior intensidade da ICU em relação ao ponto sul ainda pôde ser visualizada em um estudo de caso para a RMSP, que observou uma diferença de temperatura de 10,5°C entre a estação meteorológica localizada no centro urbano e a estação suburbana localizada no sul da RMSP (RIBEIRO et al., 2015).

Além de efeitos na intensidade da ICU na RMSP, foram notados efeitos no balanço de energia de superfície com a chegada da frente de brisa do mar no ponto sul. No mesmo horário em que ocorreu o pico de temperatura a tarde foi visto um pico na componente de fluxo de calor sensível, resultado do contraste da temperatura do ar mais frio da frente de brisa passando sobre uma superfície ainda quente, causando aumento do gradiente vertical de temperatura entre a superfície e o ar.

Foi visto ainda que a brisa do mar pode ter causado mudanças no padrão de distribuição de temperatura do ar próximo à superfície na RMSP. Nos dias em que as condições atmosféricas apontaram predominância do efeito de brisa do mar foi possível notar temperaturas mais amenas na região sul, incluindo a costa e as escarpas da Serra do Mar, enquanto a região noroeste da RMSP apresentou temperaturas mais elevadas em comparação às outras condições. Dessa forma, a brisa do mar causou o efeito de diminuição da temperatura principalmente na região sul da RMSP, local em que chega com maior intensidade.

Em estudo por meio de simulações na RMSP foi visto que, em dias em que a brisa chegou à área mais urbanizada, proporcionou a mitigação dos efeitos das altas temperaturas, melhorando o conforto térmico da região. Devido a isto, a circulação da ICU foi enfraquecida (RIBEIRO et al., 2018).

Em outro estudo para a região metropolitana de Tóquio, a passagem da frente de brisa do mar na região urbanizada também causou efeito de resfriamento, levando a uma homogeneização da temperatura. Como consequência da passagem da brisa do mar, a ICU revelou-se menos intensa à noite (ICHINOSE; SHIMODOZONO; HANAKI, 1999).

Apesar da brisa do mar ter causado a diminuição da temperatura do ar próximo à superfície na RMSP, não foi visto o efeito enfraquecimento da intensidade da ICU.

Efeito oposto foi observado, no qual a ICU, em dias de brisa do mar, foi mais intensa no período noturno em relação às outras condições atmosféricas.

A maior intensidade da ICU em dias de brisa do mar poderia ser explicada devido à formação de uma camada limite convectiva interna. Esta pode ser definida como uma região de massa de ar marinho bem misturado sobre o continente, adjacente à superfície. Esta camada é formada acoplada à parte posterior da frente de brisa do mar e cresce em altura conforme avança continente adentro (MILLER, 2003).

Após a passagem da frente de brisa, a camada limite convectiva interna, por ser constituída de ar mais frio, limitou o movimento convectivo e o volume de ar disponível para ser aquecido que se encontra dentro dela. Situação semelhante foi vista no estudo feito por Hidalgo, Masson e Gimeno (2010), no qual se encontrou uma relação oposta entre temperatura do ar e altura da camada limite.

À noite, quando o calor armazenado das construções urbanas foi liberado para a atmosfera, a camada limite convectiva interna limitou verticalmente o volume de ar disponível para ser aquecido, fazendo a temperatura no ambiente urbano aumentar. No ambiente rural, apesar de ter sofrido a influência da camada limite convectiva interna, não houve liberação de calor armazenado significativo durante a noite, fazendo com que a temperatura fosse mais amena que a do ambiente urbano. Isto poderia explicar o surgimento de uma ICU noturna mais intensa em dias de brisa do mar.

A circulação da brisa do mar ainda pode se acoplar a outros tipos de circulação em um local. Para a RMSP foi visto o acoplamento entre as circulações da brisa do mar com a circulação de vale-montanha promovida pelas escarpas da Serra do Mar e também com a circulação da própria ICU.

O acoplamento da circulação de brisa do mar com a circulação de vale ocorre quando há uma elevação do terreno relativamente perto da costa, posicionada de forma que seja aquecida pelos raios solares no mesmo ciclo diurno que a costa adjacente. O vento ascendente provocado pelo aquecimento pode se acoplar à circulação da brisa do mar, colaborando para que a frente de brisa seja levada continente adentro (MILLER et al., 2003). Esta combinação entre a circulação de vale e de brisa do mar também foi vista em estudo na China (MIAU et al., 2015) e inclusive na RMSP (RIBEIRO et al., 2018), causando o efeito de colaborar na propagação da frente de brisa no continente.

Para a RMSP ainda foi visto que, mesmo em dias em que a frente da brisa do mar não se propaga até a região mais urbanizada, combina-se com a circulação vale-montanha induzida pela escarpa ao sul. À medida que a frente da brisa do mar sobe a escarpa, resfria-se adiabaticamente, fazendo com que a região vegetada mais ao sul da RMSP sofra um resfriamento (RIBEIRO et al., 2018). Isto poderia explicar as temperaturas mais baixas no ponto sul em relação aos outros pontos vista durante todo o dia. Isso aumenta o gradiente de temperatura em relação à região central mais urbanizada da RMSP.

A intensidade do vento de escala sinótica de noroeste em direção oposta a brisa controla se esta chega à porção mais urbanizada da RMSP ou não. Quando o vento de noroeste é mais forte, a frente de brisa não chega à área mais urbanizada, mas causa a intensificação do vento da porção ao sul da ICU em direção ao centro urbanizado. Assim, a frente de brisa é presente no platô mais ao sul da RMSP e, mesmo não se propagando até a área urbana, exerce influência na intensidade da ICU da região (RIBEIRO et al., 2018).

Em relação ao acoplamento da circulação da brisa do mar com a circulação da ICU na RMSP, estudos permitiram observar que, devido à maior temperatura na área central da RMSP, cria-se um gradiente de pressão horizontal mais intenso. Dessa forma, é possível a ocorrência de um acoplamento entre o gradiente de pressão gerado pela ICU mais quente e a frente de brisa mais fria. Devido a isto a frente da brisa propaga-se de forma mais rápida até o centro de convergência do ar na área mais quente e urbanizada da RMSP. Depois de chegar ao centro com temperaturas mais elevadas, a frente da brisa do mar encontra resistência do ar que converge de norte para o centro da ICU. A circulação convergente em direção oposta à frente de brisa causa o retardamento de propagação da brisa. Assim, no trecho após o centro de convergência do ar, a frente da brisa do mar propaga-se de forma mais lenta (FREITAS, et al., 2007; RIBEIRO et al., 2018).

Dessa forma, foi visto que a presença da ICU na RMSP, além de alterar a propagação da brisa do mar devido ao maior gradiente de pressão, também poderia acarretar numa velocidade vertical mais intensa em até 5 vezes em relação a um cenário sem cidade (FREITAS, et al., 2007). Com níveis de instabilidade atmosférica e condições sinóticas favoráveis, a circulação de brisa e a circulação da ICU podem interagir e formar fortes tempestades principalmente, na área mais urbanizada da RMSP (VEMADO; PEREIRA FILHO, 2016). Assim, a presença da circulação da ICU

na RMSP também deve receber atenção devido ao seu potencial de causar eventos de precipitação mais fortes quando combinada à circulação da brisa do mar.

6.1.2.2 Frente fria – período típico

A intensidade da ICU em dias sob influência da passagem de frente fria apresentou menores variações se comparada às demais condições atmosféricas na RMSP. Isto poderia ser justificado pela maior umidade trazida por este sistema, na qual frequentemente ocorrem episódios de precipitação mais prolongados.

Foi visto que diferenças na proporção de fluxo de calor sensível e latente entre as superfícies urbana e suburbana influenciam a temperatura do ar próxima à superfície nestes locais, sendo dirigidos pela quantidade de umidade nestes ambientes. Dessa forma, quando a cidade e o ambiente rural encontram-se úmidos as diferenças de temperatura são menores, enquanto em condições mais secas a cidade tende a tornar-se uma região com maior fluxo de calor sensível (OKE, 1982).

Com a passagem de frente fria na RMSP o ambiente urbano torna-se mais úmido com as chuvas e o calor presente passa a ser perdido para a atmosfera por meio de maior quantidade de fluxo de calor latente, evitando que a temperatura do ar próxima à superfície aumente. Nesta situação, os ambientes urbano e rural tornam-se mais semelhantes em relação à disponibilidade de água, fazendo com que as diferenças de temperaturas não sejam tão grandes e a intensidade da ICU não aumente muito.

6.1.2.3 Sem frentes – período típico

Nos dias sem frentes, a temperatura do ar próximo à superfície apresentou-se mais elevada, porém a intensidade da ICU não foi tão alta quanto nos dias de influência predominante da brisa do mar.

Nestes dias, áreas mais quentes foram observadas nas escarpas e na costa, locais mais ao sul da RMSP. Um estudo conduzido para a RMSP apresentou comportamento semelhante, no qual foi visto que, em dias sem influência da brisa do mar, a ICU encontrou-se deslocada para o sul em razão do vento de escala sinótica vindo de norte (RIBEIRO et al., 2018).

Além disso, no caso dos dias sem frentes, a intensidade diurna da ICU não sofre influência da brisa do mar e frente fria, que poderiam interferir no seu padrão de comportamento diurno. Assim, em dias sem frentes foi possível separar o efeito de demais circulações e observar de forma mais isolada a influência da cobertura de solo no campo de temperatura da RMSP.

6.1.2.4 Total – período típico

Observou-se que a média total da intensidade da ICU, considerando todos os dias, independente da condição atmosférica predominante, se mostrou muito semelhante à intensidade da ICU nos dias sob influência predominante da brisa do mar.

A brisa do mar é esperada quando condições sinóticas favorecem o rápido aquecimento da superfície terrestre em comparação com a superfície do mar (DIAS; MACHADO, 1997). Um estudo indicou que, para países de clima temperado, é preciso que haja um contraste positivo de diferença de temperatura entre a costa e o mar de pelo menos 5°C para que a frente de brisa penetre maiores distâncias continente adentro (MILLER et al., 2003). Visto isto, um fator fundamental para a propagação da brisa do mar continente adentro é a diferença do fluxo de calor sensível entre a superfície do continente e do mar (CROSMAN; HOREL, 2010).

Dessa forma, características da intensidade da ICU em dias de brisa do mar foram bastante presentes na média total, porque estas condições são encontradas no verão na RMSP e portanto favoráveis a ocorrência deste evento.

6.2 INTENSIDADE DA ICU ATÍPICA

De forma geral o padrão de comportamento da intensidade da ICU atípica não se distanciou muito da intensidade da ICU típica. Porém, foi visto que a intensidade da ICU atípica foi maior no período noturno e menor no período diurno em relação a ICU típica.

Estudos apontaram que episódios de verões atipicamente quentes secos resultaram em maiores intensidades da ICU noturna durante este período, classificados como períodos sob influência de ondas de calor (LI; BOU-ZEID, 2013; WANG et al., 2017). Ainda em outro estudo conduzido por meio de observações para

a RMSP, foi visto que, no verão de 2014, sob influência da massa de ar quente e seca, a intensidade da ICU sofreu um aumento na sua intensidade em pelo menos um fator de 2 (RIBEIRO et al., 2015).

Estes resultados indicam que a intensidade da ICU é afetada por condições sinóticas (CARDOSO et al., 2017). Visto isto, o verão de 2014 pôde ser considerado favorável à maior intensidade de ICU, pois trabalhos mostraram que diferenças de temperatura foram mais pronunciadas sob condições de atmosfera estável, controladas especialmente por menor precipitação, menos nebulosidade e ventos mais calmos (ACKERMAN, 1985; JAUREGUI, 1997; KIM; BAIK, 2002; CHOW; ROTH, 2006; CARDOSO et al., 2017; WANG et al., 2017).

6.2.1. Balanço de energia - período atípico

A condição sinótica presente no verão de 2014 deu origem a uma atmosfera mais estável e seca. Assim, a análise do balanço de energia neste período foi um importante fator para justificar a maior intensidade da ICU atípica vista na RMSP.

6.2.1.1 Fluxo de radiação líquida – período atípico

A componente de radiação líquida foi maior para todos os pontos no cenário atípico que no típico na RMSP. Resultado semelhante foi visto em estudo a partir de modelagem em evento de onda de calor em 2013 na China, no qual foi observado aumento na quantidade de radiação solar líquida devido à diminuição de cobertura de nuvens (WANG et al., 2017).

Um experimento por meio de modelagem conduzido para a Europa sob a influência da onda de calor em 2003 também indicou anomalias positivas de radiação líquida. Porém foi visto que as temperaturas extremas registradas foram resultado da repartição da radiação líquida em fluxos de calor sensível e latente. Dessa forma, as temperaturas extremas não foram diretamente infligidas pelas anomalias positivas de radiação líquida (FISHER et al., 2007).

Isto indica que janeiro de 2014 foi um período de pouca cobertura de nuvens permitindo que mais radiação solar chegasse à superfície. Apesar disso, a maior radiação incidente não foi o principal fator que causou anomalias de temperatura neste período. A quantidade da repartição da radiação líquida entre fluxos de calor sensível

e latente mostraram ter importância maior para as temperaturas mais elevadas e diferenças na intensidade da ICU vistas em janeiro de 2014.

6.2.1.2 Fluxo de calor latente – período atípico

Quanto aos valores da componente de fluxo de calor latente, estes variaram de acordo com o ponto observado. Nos pontos centro e leste não foram notadas diferenças na quantidade de fluxo de calor latente entre os cenários típico e atípico. Nos pontos oeste e sul foram vistos valores menores para o cenário atípico e o ponto norte foi o único que apresentou maior quantidade de fluxo de calor latente em 2014.

Em estudo feito nos Estados Unidos, observou-se que a diferença de disponibilidade de água para evaporação entre ambiente urbano e rural foi o principal fator para a intensificação da ICU em sinergia com o episódio de onda de calor (ZHAO et al., 2018).

Ao analisar o balanço de energia em período sob influência de onda de calor na Europa, foi visto que a repartição da radiação líquida entre fluxo de calor sensível ou latente se mostrou fortemente influenciada pela quantidade de umidade do solo da região. O fluxo de calor latente foi menor que a sua média climatológica, que por sua vez, foi compensada pelo aumento do fluxo de calor sensível. Dessa forma, a falta de umidade no solo resultou em pouca evaporação e o resfriamento do solo foi compensado por calor sensível. Isto amplificou anomalias positivas de temperatura do ar no período analisado (FISHER et al., 2007).

De forma semelhante, em estudo na região metropolitana de Baltimore-Washington, foi visto que, durante episódios de ondas de calor, a temperatura do ambiente urbano tende a sofrer maiores elevações em comparação com o rural. Isto se deve em razão do ambiente rural ter processo de evaporação favorecido. Dessa forma, o ambiente rural teve o aumento de temperatura limitado por ser mais úmido em comparação ao ambiente urbano, dando origem a uma ICU mais intensa. (LI; BOU-ZEID, 2013).

Assim, as variações vistas na RMSP para o fluxo de calor latente em 2014 poderiam ser explicadas pelas variações de disponibilidade de água presente nos pontos considerados rurais.

6.2.1.3 Fluxo de calor sensível – período atípico

Em relação ao fluxo de calor sensível, foram vistos valores visivelmente maiores somente nos pontos rurais no cenário atípico em comparação com o típico durante o período diurno.

Durante a manhã foi vista uma queda pronunciada na intensidade da ICU atípica, mais acentuada que a da ICU típica. A explicação para este comportamento seria a menor quantidade de umidade no ambiente rural, devido à pouca precipitação em janeiro de 2014, pois um ambiente mais seco tende a sofrer maiores variações de temperatura.

Este efeito da umidade na temperatura do ar próximo à superfície foi observado em estudo conduzido na estação seca com condições anticiclônicas na Cidade do México. Neste encontrou-se uma relação inversa entre a quantidade de precipitação e a intensidade da ICU (JAUREGUI, 1997).

Isto poderia indicar que, em janeiro de 2014, a temperatura do ar próxima à superfície no ambiente rural foi maior durante o dia comparado a média do cenário típico. Em razão disto, o contraste de temperatura entre o ambiente e rural foi diminuído e a intensidade da ICU foi menor durante à tarde e principalmente de manhã.

6.2.1.4 Calor armazenado – período atípico

O calor armazenado apresentou-se ligeiramente maior para os pontos rurais e de forma um pouco mais pronunciada para o ponto centro durante janeiro de 2014.

Em estudo para região metropolitana de Baltimore-Washington, durante episódio de onda de calor, a maior intensidade da ICU a noite foi justificada pelo maior fluxo de calor para o solo no ambiente urbano, que foi liberado no período noturno, causando o efeito de aumento na intensidade da ICU (LI; BOU-ZEID, 2013).

Caso semelhante foi visto para uma região urbanizada na China durante o período de onda de calor no verão de 2013. Observou-se que à noite o calor armazenado nas construções foi liberado para a atmosfera. Isto foi apontado como responsável pelo aquecimento urbano à noite, com formação de pico da intensidade da ICU após o pôr do sol (WANG et al., 2017).

Dessa forma, as construções presentes na área urbanizada da RMSP armazenaram maior quantidade de calor durante o dia, e da mesma forma, o liberaram para a atmosfera no período noturno. Isto poderia justificar a elevação de temperatura na área urbana e consequente formação de uma ICU atípica noturna mais intensa.

Uma particularidade em janeiro de 2014, durante o período noturno no ponto centro, foi a diminuição do fluxo calor sensível da superfície para a atmosfera e o aumento do fluxo de calor armazenado para a atmosfera. Esta diminuição de perda de calor por fluxo de calor sensível seria explicada devido à superfície e a atmosfera estarem ambas com temperaturas mais elevadas, diminuindo contrastes entre estas duas interfaces. Dessa forma, o calor armazenado foi favorecido e a perda de calor ocorreu majoritariamente em forma de ondas longas. Assim, o calor armazenado poderia ser apontado como um fator importante para o aumento na intensidade da ICU atípica noturna.

6.2.2 Intensidade da ICU atípica em diferentes condições atmosféricas

Na presente subseção foi discutido o comportamento da intensidade da ICU atípica diferenciada pela situação atmosférica predominante. Assim, comparações foram feitas entre as ICU típica e atípica em dias sob influência predominante da brisa do mar, dias sem frentes e dias totais.

6.2.2.1 Brisa do mar – período atípico

A ICU atípica em dias de brisa, apesar de ter apresentado o mesmo padrão de comportamento visto na a ICU típica, mostrou-se mais intensa à noite e menos intensa durante a manhã. Este comportamento foi visto de forma geral para o período atípico e discutido no subitem anterior.

A maior intensidade da ICU atípica foi vista principalmente para o ponto sul. Da mesma forma, este foi o local que apresentou maior quantidade de fluxo de calor sensível em comparação ao cenário típico. Isto ocorreu próximo às 13 h, horário em que a frente de brisa costuma chegar ao ponto sul. Uma explicação para esta maior quantidade de fluxo de calor sensível em janeiro de 2014 seria em função do maior contraste de temperatura do solo mais quente e a massa de ar mais fria vinda do mar, gerando maior gradiente vertical de temperatura.

Já a maior intensidade da ICU atípica seria causada por motivo semelhante. Em razão da temperatura do ar próximo à superfície da RMSP ter sido mais elevada durante janeiro de 2014, foi gerado um contraste de temperatura maior principalmente entre o ponto centro e o ponto sul, que por sua vez, sofreu os efeitos da passagem da brisa do mar em maior intensidade. Assim, a intensidade da ICU diurna foi maior neste período.

A maior intensidade da ICU atípica no período noturno em dias de brisa seria justificada pela intensificação de efeito já discutido para o caso da ICU típica em dias sob influência da brisa do mar. A intensificação da ICU nos dias de brisa teria causa na maior quantidade de calor armazenado no dossel urbano, que por sua vez, foi liberado no período noturno em janeiro de 2014.

6.2.2.2 Sem frentes – período atípico

Nos dias sem frentes, apesar do padrão de comportamento semelhante, foi a situação em que os valores mais se distanciaram entre ICU típica e atípica. Foi visto uma queda mais acentuada da intensidade da ICU atípica durante a manhã e da mesma forma ocorreu um aumento acentuado ao pôr do sol, principalmente para os pontos norte e oeste. Ainda foram observadas ocorrências de *urban cool island* para os pontos leste e sul.

Além disso, foi visto que no cenário atípico a intensidade da ICU começou a aumentar às 8 h, duas horas antes em comparação com a recuperação da intensidade da ICU típica, também de forma mais acentuada. Assim, a justificativa apontada para as variações mais acentuadas da intensidade da ICU em curto espaço de tempo seria a menor quantidade de umidade presente nas áreas rurais da RMSP em janeiro de 2014. Semelhante ao visto para a intensidade da ICU atípica em dias de brisa do mar.

6.2.2.4 Total – período atípico

O comportamento da intensidade da ICU atípica total também foi parecido com o comportamento visto na intensidade da ICU em dias de brisa, como o caso da ICU típica total.

Este padrão é justificável, pois as condições meteorológicas vistas em janeiro de 2014 mostraram-se ainda mais favoráveis à propagação da brisa na RMSP. A

explicação se deve às condições de ventos calmos e atmosfera estável serem mais favoráveis para penetração da brisa do mar no continente em distâncias mais longas (MILLER et al., 2003; MIAU et al., 2015).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de simulação numérica utilizando o WRF foi possível caracterizar a ICU típica, correspondente à média de janeiros do período entre 2004 a 2013, e traçar comparações com a ICU atípica, referente ao período de janeiro de 2014.

Durante janeiro de 2014, a RMSP experienciou um verão atípico devido à atuação de um bloqueio atmosférico, situado na região central e sudeste do Brasil. A atuação deste sistema enfraqueceu a ZCAS e impediu a passagem de frentes frias durante todo o mês, resultando na ocorrência de anomalias de temperatura positivas e de precipitação negativas. Dessa forma, destaca-se os principais resultados:

- (a) Observou-se que, tanto para o cenário típico quanto atípico, a resposta térmica à radiação líquida do ambiente urbano foi mais lenta que a do rural. Isto resultou em um padrão de comportamento na intensidade da ICU que diminui de forma acentuada ao nascer do sol, formando uma ICU com intensidade mínima durante a manhã. Ao pôr do sol, foi visto que a intensidade da ICU aumenta de forma pronunciada, permanecendo mais intensa durante o período noturno. A ICU de intensidade mínima de manhã poderia ser explicada devido à maior admitância térmica da superfície urbana e sombreamento causado pelas construções fazendo com que a sua temperatura se eleve a menores taxas. No ambiente rural, a altura da camada limite mais baixa promove o aquecimento mais rápido da coluna de ar do local promovendo um aquecimento mais rápido. Já durante o período noturno a ICU foi mais intensa em razão dos materiais que compõem o ambiente urbano serem mais favoráveis ao armazenamento de calor, que por sua vez, é liberado para a atmosfera à noite. Além disso, a geometria urbana tende a retardar esta perda de calor por causa da presença de construções mais altas.
- (b) Foi visto que diferentes condições atmosféricas podem resultar em diferentes padrões de ICU, tanto para a típica quanto para a atípica. Em dias com brisa do mar, o padrão de distribuição espacial do campo de temperatura da RMSP sofreu mudanças, pois foi criado um padrão de gradiente de temperatura com a região sul mais fria e norte mais quente. Ainda foi visto que nestes dias a ICU tende a ser

mais intensa à noite em comparação com as outras condições, devido ao efeito que a camada limite convectiva exerceu, aprisionando o calor armazenado em menores altitudes no ambiente urbano. Nos dias de frente fria a intensidade da ICU sofreu menores variações em relação às outras condições devido à precipitação típica nestes dias, favorecendo a maior umidade dos ambientes urbano e rural causada pela precipitação. Assim, as variações de temperatura foram menores. Já nos dias sem a presença de frentes, áreas mais quentes foram vistas ao sul da RMSP devido à ausência de sistemas que costumam vir de sudeste, trazendo ar mais frio do oceano. Por fim, foi observado que a ICU do total de dias mostrou-se muito semelhante a ICU vista em dias de brisa do mar, indicando que este fenômeno influencia de forma significativa o campo de temperatura da RMSP.

- (c) Ao comparar a ICU típica e atípica, não foram vistas diferenças significativas no padrão de comportamento, mas distinções nos valores de intensidade foram visíveis. A ICU atípica mostrou variações em sua intensidade ao nascer e pôr do sol de forma mais acentuada, que resultaram em uma ICU mais intensa à noite e menos intensa no período da manhã, com formação de *urban cool island* para alguns casos. Este comportamento pode ser justificado em razão da menor disponibilidade de água observada em 2014, fazendo com que os mesmos fatores vistos na formação da ICU típica atuassem de forma mais intensa. Assim, durante a manhã com o ambiente rural mais seco, a temperatura subiu mais rapidamente, fazendo com que a ICU fosse menor. Enquanto durante a noite, com a baixa umidade e atmosfera e solo mais quentes, o armazenamento de calor foi favorecido, sendo fator importante para o aumento de intensidade da ICU em janeiro de 2014. Nestas condições, maior quantidade de radiação líquida foi armazenada durante o dia e liberada durante a noite em forma de fluxo turbulento, mas também em forma de onda longa. Além disso, a menor nebulosidade aumentou a quantidade de radiação líquida em janeiro de 2014, favorecendo a maior intensidade da ICU.

Por meio deste estudo, foi visto que a ICU em 2014 foi mais intensa principalmente à noite, não necessariamente em razão da maior quantidade de radiação líquida, mas por causa da pouca disponibilidade de água. A menor quantidade de umidade fez com que as diferentes propriedades térmicas dos materiais do ambiente urbano e rural tivessem maior papel na temperatura do

ambiente. Portanto, uma sinergia entre a ICU e o evento atípico visto no verão de 2014 foi identificada na RMSP.

É preciso salientar que a ordem de importância na influência destas variáveis sobre a intensidade da ICU pode sofrer mudanças de acordo com as estações do ano, como visto no estudo de Kim e Baik (2002). Visto isso, é possível que a ICU da RMSP sofra mudanças de acordo com a variação sazonal e as principais variáveis para a formação da ICU no verão podem não ter a mesma ordem de influência para a formação da ICU no inverno, por exemplo. Isto reforça a ideia da necessidade de estudos da ICU em outras épocas do ano na RMSP.

Em um cenário futuro de mudanças climáticas, é necessário destacar a possibilidade de sinergia entre ondas de calor e ICU, que poderão acarretar maior necessidade no uso de aparelhos para resfriar o ambiente, como aparelhos de ar condicionado (ZHAO et al., 2018). Por isso, estratégias de mitigação e adaptação para as ICUs são necessárias na RMSP.

Há diversas estratégias de mitigação para as ICUs descritas na literatura, dentre estas estão mudanças na geometria urbana, aumento de vegetação no ambiente urbano, uso de superfícies com maior albedo e implantação de corpos d'água. Visto isso, não é possível eleger uma estratégia de mitigação mais eficiente, pois cada uma apresentará melhor desempenho de acordo com as características do local urbano (LAI et al., 2019). Ainda é preciso enfatizar que além da escolha das estratégias é necessário quantificar a aplicação destas estratégias de mitigação em um local. Um exemplo seria calcular a quantidade de vegetação urbana necessária em uma cidade para que se possa atingir uma eficiência ótima de resfriamento do ambiente (YU et al., 2020).

Apesar da existência de vários estudos com estratégias de mitigação para as ICUs a implantação dessas estratégias nem sempre ocorre. Em muitos estudos é possível obter dados climáticos e características espaciais das cidades, porém estas informações são insuficientes para a garantia de viabilidade, pois negligencia o contexto socioeconômico, de gestão e capacidade da cidade (AMBREY et al., 2017; PARSAEE et al., 2019). Em conjunto é preciso criar estratégias para que o clima urbano seja priorizado pela população e tomadores de decisão de forma que haja engajamento público a favor destas estratégias. Isto pode incluir incentivos econômicos ou popularização dos benefícios ambientais caso as estratégias sejam adotadas. (YOW, 2007; AMBREY et al., 2017; PARSAEE et al., 2019).

No cenário do planejamento urbano na RMSP a implantação de estratégias voltadas para a sustentabilidade parece não ter obtido muitos avanços. Um estudo mostrou que apesar das iniciativas de criação de instrumento, programas e projetos para a sustentabilidade no planejamento ambiental urbano, sua implementação ainda é tímida na cidade de São Paulo. O governo não tem tido recursos para lidar com o déficit habitacional e tem se limitado a fazer mudanças no zoneamento ambiental da cidade para contornar o problema. Dessa forma, algumas zonas reservadas a preservação da vegetação passaram a ser destinadas para moradia da população de baixa renda (RAMIRES; MELLO-THÉRY, 2018).

Ainda é preciso se atentar a questões metodológicas para a construção de políticas públicas mais eficientes na RMSP. A gestão baseada na dicotomia centro-periferia se mostra insuficiente para a produção de bons resultados. O padrão socioeconômico de São Paulo não necessariamente segue a divisão geográfica em distritos, em razão disso é preciso considerar o uso de outras metodologias captem a heterogeneidade urbana para a promoção de políticas públicas mais eficientes (NERY; SOUZA; ADORNO, 2019).

Enfim, é preciso considerar uma série de fatores além do clima local. O estudo da viabilidade das diferentes estratégias e percepção e comportamento da população local são fundamentais para que estratégias de mitigação da ICU tenham sucesso. Ou seja, é necessário promover o estudo de ciências naturais e sociais de forma conjunta (LAI et al., 2019; PARSAEE et al., 2019; YU et al., 2020). O presente estudo limitou-se a analisar a ICU da RMSP sob a perspectiva das ciências naturais utilizando uma resolução de média escala. Isto foi importante para fornecer uma caracterização da ICU na RMSP e reforçar a necessidade de adoção de medidas de mitigação e adaptação principalmente em episódios de ondas de calor. Porém, é necessário a realização de estudos mais detalhados que considerem a climatologia e características sociais da RMSP para a adoção de estratégias de mitigação.

A urbanização é um fenômeno ainda presente RMSP e a tendência é que, somado aos efeitos das mudanças climáticas, seus impactos negativos afetem principalmente a parte da população mais vulnerável. Em razão disso, é fundamental que medidas sejam tomadas para que a forma de urbanização praticada tradicionalmente dê lugar a um modelo de urbanização com potencial para diminuir a vulnerabilidade da população na RMSP.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, B. Temporal March of the Chicago heat island. **Journal of climate and applied meteorology**, v. 24, n. 6, p. 547-554, 1985. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26181522?seq=1>. Acesso em: 15 jan. 2020
- AGUIAR, L. F. M. C. et al. Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos com áreas com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza, Ceará. **Revista brasileira de geografia física**, v. 10, n. 4, p. 1046-1058, 2017. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1046-1058>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233986>. Acesso em: 26 out. 2018.
- AHRENS, C. D. **Meteorology today**: an introduction to weather, climate, and the environment. 9. ed. London: Brooks/Cole, 2009.
- AMBREY, C. et al. Cultivating climate justice: Green infrastructure and suburban disadvantage in Australia. **Applied Geography**, v. 89, n. December 2017, p. 52-60, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622817302138>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International journal of climatology**, Columbus, OH, v. 23, n. 1, p. 1-26, 2003. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.859>. Acesso em: 18 ago. 2018.
- ASAEDA, T.; VU, T. C. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model. *Boundary-layer meteorology*, v. 65, n. ½, p. 159-179, 1993. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00708822>. Acesso em: 15 jan. 2020
- BARROS, H. R. de; LOMBARDO, M. A. **Heat island in the city of São Paulo**: the thermal field of parks. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
- CARDOSO, R. S. et al. Assessment of urban heat islands in small- and mid-sized cities in Brazil. **Climate**, v. 5, n. 14, p. 1-13, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/5/1/14>. Acesso em: 15 jan. 2020
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Sistema de informações da qualidade do ar**. [São Paulo], 2018. Disponível em: <http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>. Acesso em: 27 out. 2018.
- CGE - CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS DA PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Dados meteorológicos**. [São Paulo], 2019. Disponível em: <http://23.254.165.146/public.php?service=files&t=eb4ad2cf4b7de9ab7aa21fce6817d988>. Acesso em: 14 jan. 2020.

CHEN, F. et al. The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. **International journal of climatology**, v. 31, n. 2, p. 273-288, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2158>. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.2158>. Acesso em: 18 ago. 2018.

CHOW, W. T. L.; ROTH, M. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. **International journal of climatology**, v. 26, n. 15, p. 2243–2260, 2006. DOI: =10.1002/joc.1364. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1364>. Acesso em: 15 jan. 2020

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, n. 3/4, p. 769-784, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-015-1540-9>. Acesso em: 18 ago. 2018.

CPTEC-INPE – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Boletim técnico**. [Brasil], 2014a. Disponível em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>. Acesso em: 27 out. 2018.

CPTEC-INPE – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Síntese sinótica mensal do mês de janeiro de 2014**. [Brasil], 2014b. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/125818>. Acesso em: 28 dez. 2019.

CROSMAN, E. T.; HOREL, J. D. Sea and Lake Breezes: A Review of Numerical Studies. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 137, n. 1, p. 1-29, 2010. DOI: 10.1007/s10546-010-9517-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10546-010-9517-9>. Acesso em: 15 jan. 2020

DIAS, M. A.; MACHADO, A. J. The role of local circulations in summertime convective development and nocturnal fog in São Paulo, Brazil. **Boundary-layer meteorology**, v. 82, n. 1, p. 135-157, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1000241602661>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1000241602661#citeas>. Acesso em: 15 jan. 2020.

DONG, L. et al. The dynamical linkage of atmospheric blocking to drought, heat wave and urban heat island. in southeastern US: a multi-scale case study. **Atmosphere**, v. 9, n. 33, p. 1-18, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/1/33>. Acesso em: 15 jan. 2020.

FERREIRA, M. J. et al. Radiation balance at the surface in the city of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 229-246. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0480-2>. Acesso em: 15 ago. 2018. Acesso em: 15 jan. 2020.

FERREIRA, M. J; OLIVEIRA, A. P. de; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 104, n. 1/2, p. 43-56, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0322-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00704-010-0322-7>. Acesso em: 15 ago. 2018.

FERREIRA, M. J; OLIVEIRA, A. P. de; SOARES, J. Diurnal variation in stored energy flux in Sao Paulo city, Brazil. **Urban climate**, v. 5, n. out./2013, p. 36-51, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.06.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095513000254>. Acesso em: 15 ago. 2018.

FISHER, E. M. et al. Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 european summer heat wave. **Journal of climate**, v. 20, n. 20, p. 5081-5099, 2007. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JCLI4288.1>. Acesso em: 15 jan. 2020.

FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 62, n. 5, p. 599-609, 1981. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200477%281981%29062%3C0599%3AJAQMP%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 15 jan. 2020.

FREITAS, E. D., et al. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43-65, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9091-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10546-006-9091-3>. Acesso em: 18 ago. 2018.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista brasileira de meteorologia**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005. Disponível em: http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_artigo.php?id_artigo=140. Acesso em: 17 mai. 2017.

GIANNAROS, T. M. et al. Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. **Atmospheric environment**, v. 73, n. jul. 2013, p. 103-111, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231013001726>. Acesso em: 15 jan. 2020.

GREC-USP - GRUPO DE ESTUDOS CLIMÁTICOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Relatório climatológico mensal do GREC. São Paulo, 2014. Disponível em: http://www.grec.iag.usp.br/data/monitoramentoclimatico_BRA.php. Acesso em 23 dez. 2019.

HIDALGO, J.; MASSON, V.; GIMENO, L. Scaling the daytime urban heat island. and urban-breeze circulation. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 49, n. 5, p. 889-901, 2010. DOI: 10.1175/2009JAMC2195.1. Disponível em:

<https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2009JAMC2195.1>. Acesso em: 15 jan. 2020.

HILDEBRAND, P. H.; ACKERMAN, B. Urban effects on the convective boundary layer. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 41, n. 1, p.76-91, 1984. Disponível em:

<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200469%281984%29041%3C0076%3AUEOTCB%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 15 jan. 2020.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. **Computing in Science & Engineering**, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/4160265>. Acesso em: 15 jan. 2020.

IAG-USP - INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Solicitação de dados**. [São Paulo], 2014a. Disponível em: http://www.estacao.iag.usp.br/sol_dados.php. Acesso em: 22 dez 2019.

IAG-USP – INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Boletim climatológico anual da estação meteorológica do IAG/USP – 2014**. São Paulo, 2014b. Disponível em: <http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/2014.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2018.

IAG-USP – INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Boletim climatológico trimestral da estação meteorológica do IAG/USP – DJF 2013/2014 - verão**. São Paulo, 2014c. Disponível em: <http://www.estacao.iag.usp.br/Boletins/DJF20132014.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2019

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Áreas Urbanizadas do Brasil – 2015**: concentração urbana de São Paulo. Rio de Janeiro: Coordenação de Geografia/DGC/IBGE, 2017a. Escala 1:500.000. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/areas_urbanizadas/. Acesso em: 26 out. 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE cidades – São Paulo**. [Brasil], 2017b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>. Acesso em: 14 jan. 2020.

ICHINOSE, T; SHIMODOZONO, K; HANAKI, K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. **Atmospheric environment**, v. 33, n. 24/25, p. 3897-3909, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231099001326>. Acesso em: 15 jan. 2020.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA E ECONOMIA APLICADA. **Atlas do desenvolvimento humano nas regiões urbanas brasileiras**. [Brasil], 2014. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=24037. Acesso em: 14 jan. 2020.

JARVIS, A. et al. **Hole-filled SRTM for the globe**. Version 4. [S. l.], 2008. Disponível em: <https://research.utwente.nl/en/publications/hole-filled-srtm-for-the-globe-version-4-data-grid>. Acesso em: 15 jan. 2020.

JAUREGUI, E. Heat island. development in Mexico city. *Atmospheric environment*, v. 31, n. 22, p. 3821-3831, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231097001362>. Acesso em: 15 jan. 2020.

KIM, Y.; BAIK, J. Maximum urban heat island. intensity in Seoul. **Journal of applied meteorology**, v. 41, n. 6, p. 651-659, 2002. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0450%282002%29041%3C0651%3AMUHIII%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 15 jan. 2020.

LAI, D. et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. **Science of the total environment**, v. 661, n. 15 April 2019, p. 337-353, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719300683>. Acesso em: 28 abr. 2020.

LI, D.; BOU-ZEID, E. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: the impact in cities is larger than the sum of its parts. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 52, n. 9, p. 2051-2064, 2013. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAMC-D-13-02.1>. Acesso em: 15 jan. 2020.

LI, H. et al. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. **Science of the total environment**, v. 636, n. 15 September 2018, p. 818-828, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718314311>. Acesso em: 28 abr. 2020.

LI, X; NORFORD, L. K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. **Urban climate**, v. 16, n. jun. 2016, p.59-74, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095515300390>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MARENGO, J., et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, v. 106, p. 31-44, 2015. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110009/108615>. Acesso em : 24 fev. 2020.

MIAU, Y. et al. Numerical study of the effects of topography and urbanization on the local atmospheric circulations over the Beijing-Tianjin-Heibei, China. **Advances in meteorology**, v. 2015, p.1-16, 2015. Disponível em: <https://new.hindawi.com/journals/amete/2015/397070/>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MILLER, S. T. K. et al. Sea breeze: structure, forecasting and impacts. **Reviews of geophysics**, v. 41, n. 3, p. 1-31, 2003. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003RG000124>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MILLS, G. Cities as agentes of global change. **International jornal of climatology**. v. 27, n. 14, p. 1849-1857, 2007. DOI: 10.1002/joc.1604. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.1604>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MORAIS, M. A. de; CASTRO, W. A. C. de; TUNDISI, J. G. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência na limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 205-217, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-77862010000200005&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 15 jan. 2020.

MURPHY, D. J. et al. The relationship between land cover and the urban heat island in northeastern Puerto Rico. *International journal of climatology*, v. 31, n. 8, p. 1222–1239, 2011. DOI: 10.1002/joc.2145. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2145>. Acesso em: 15 jan. 2020.

NERY, M. B.; SOUZA, A. A. L. de; ADORNO, S. Os padrões urbano demográficos da capital paulista. **Estudos Avançados**, v. 33, n. 97, p. 5-36, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142019000400005&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 28 abr. 2020.

NOBRE, C. A. et al. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. In: MOTTA, R. S. da et al. (editores). **Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios**. Brasília, 2011, 233-260. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/3162>. Acesso em: 15 jan. 2020.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**, 2. ed. New York: Routledge, 2009.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly jornal of the Royal Meteorologycal Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

OLIVEIRA, A. P.; ROBERT D. BORNSTEIN, R. D.; SOARES, J. Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. **Water, air and soil pollution: focus**, v. 3, n. 5, p. 3-15, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026090103764>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1026090103764> Acesso em: 15 ago. 2018.

OLIVEIRA, S. S. de; SOUZA, E. P. de. Análise de modelos de mesoescala para caracterização do potencial eólico do estado da Paraíba. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 277-291, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863220009>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000200277. Acesso em: 15 jan. 2020.

PARSAEE, M. et al. Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans. **Environmental technology & innovation**, v. 14, n. May, 2019, p. 1-16, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186418304541>. Acesso em: 28 abr. 2020.

PEREZ, G. M. P.; SILVA DIAS, M. A. F. Long-term study of the occurrence and time of passage of sea breeze in São Paulo, 1960–2009. **International journal of climatology**, v. 37, n. S1, p. 1210–1220, 2017. DOI: 10.1002/joc.5077. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5077>. Acesso em: 15 jan. 2020.

RAIMUNDO, S. A paisagem natural remanescente na Região Metropolitana de São Paulo. **São Paulo em Perspectiva**, v. 20, n. 2, p. 19-31. 2006. Disponível em: <http://produtos.seade.gov.br/produtos/spp/index.php?men=rev&cod=5073>>. Acesso em: 27 out. 2018.

RAMIRES, J. Z. dos S.; MELLO-THÉRY, N. A. de. São Paulo: avanços e recuos, após quase uma década da política de mudança do clima. **Revista franco-brasileira de geografia**, v. 2018, n. 38, p. 1-11. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/17041>. Acesso em: 28 abr. 2020.

RIBEIRO, F. N. D. et al. Effect of sea breeze propagation on the urban boundary layer of the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v. 214, p. 174-188. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.015>. Acesso em: 15 ago. 2018.

RIBEIRO, F. N. D. et al. Urban heat island in the metropolitan area of São Paulo and the influence of warm and dry air masses during summer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 9, 2015, Toulouse. **Proceedings [...]**. [s. l.; s. n.], [6] p. Disponível em: <http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/>. Acesso em: 14 jan. 2020.

RYU, Y.; BAIK, J. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 51, n. 5, p. 842-854, 2012. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-098.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JAMC-D-11-098.1>. Acesso em: 15 jan. 2020.

SCHLÜNZEN, K. H.; KATZFEY, J. J. Relevance of sub-grid-scale land-use effects for mesoscale models. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 55, n. 3, p. 232-246, 2003. DOI: 10.3402/tellusa.v55i3.12095. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusa.v55i3.12095>. Acesso em: 15 jan. 2020.

SILVA, E. D. da; RIBEIRO, H. Alterações da temperatura em ambientes externos de favela e desconforto térmico. **Rev Saúde Pública**, v. 40, n. 4, p. 663-670, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rsp/v40n4/16.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2020.

SILVA, F. B.; LONGO, K. M.; ANDRADE, F. M. Spatial and temporal variability patterns of the urban heat island. In São Paulo. **Environments**, v. 4, n. 2. p. 1-26, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments4020027>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/4/2/27>. Acesso em: 18 ago. 2018.

SKAMAROCK, W.C., et al. **A description of the Advanced Research WRF version 3**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR 2008. Boulder, 2008. Disponível em: <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>. Acesso em: 18 ago. 2018.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Springer, 2009. (Atmospheric and oceanographic sciences library, 13).

UN – UNITED NATIONS. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2020.

VEMADO, F.; PEREIRA FILHO, A. J. Severe weather caused by heat island and sea breeze effects in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2016, n. especial issue, p. 1-13, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8364134>. Acesso em: 18 ago. 2018. Disponível em: <https://new.hindawi.com/journals/amete/2016/8364134/>. Acesso em: 15 jan. 2020.

WANG, J. et al. Urban warming in the 2013 summer heat wave in eastern China. **Climate Dynamics**, v. 48, n. 9/10, p. 3015-3033, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3248-7>. Acesso em: 15 jan. 2020.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477%281982%29063%3C1309%3ASCOTEO%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 15 jan. 2020.

YOW, D. M. Urban heat islands: observations, impacts, and adaptation. **Geography Compass**, v. 1, n. 6, p. 1227–1251, 2007. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2007.00063.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1749-8198.2007.00063.x>. Acesso em: 15 jan. 2020.

YU, Z. et al. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: a threshold-size perspective. **Urban forestry & urban greening**, v. 49, n. March 2020, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866719302572>. Acesso em: 28 abr. 2020.

ZHAO, L. et al. Interactions between urban heat islands and heat waves. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 3, p. 1-11, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa9f73>. Acesso em: 15 jan. 2020.

APÊNDICE A – TESTES ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Teste estatístico	Explicação	Equação	Resultado	Referência
Correlação linear	Calcula o grau de correlação entre duas variáveis, no caso, o valor observado e modelado. Para este estudo foi adotado o ajuste linear utilizando o método dos mínimos quadrados para o ajuste dos valores na reta.	$r = \frac{\sum(m_i - \bar{m}_i)(o_i - \bar{o}_i)}{\sqrt{[\sum(m_i - \bar{m}_i)^2][\sum(o_i - \bar{o}_i)^2]}}$ <p>Onde r = coeficiente de correlação m = valor modelado o = valor observado n = número de dados de comparação</p>	Quanto mais próximo de 1 ou -1 mais forte é a correlação entre os valores observados e modelados. Se o valor for zero, não há correlação entre as variáveis.	Oliveira e Souza (2017)
Erro médio quadrático	Avalia a diferença do valor observado e modelado por meio da média do quadrado do erro.	$EMQ = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{n}$ <p>Onde EMQ = erro médio quadrático m = valor modelado o = valor observado n = número de dados de comparação</p>	Quanto mais próximo o resultado for de zero, melhor o modelo aproximou-se da realidade.	Fox (1981)
Raiz quadrada do erro médio quadrático	Equivale a raiz quadrada do erro médio quadrático.	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{n}}$ <p>Onde RMSE = raiz quadrada do erro médio quadrático m = valor modelado o = valor observado n = número de dados de comparação</p>	-	Fox (1981)

<i>Bias</i>	Apresenta a diferença entre a média dos valores observados e calculados.	$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n o_i - \sum_{i=1}^n m_i}{n}$ <p>Onde m = valor modelado o = valor observado n = número de dados de comparação</p>	-	Fox (1981)
<i>Index of agreement</i>	Fornece a porcentagem dos valores modelados que “concordam” com os valores observados.	$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{o} + o_i - \bar{o})^2}$ <p>Onde IOA = index of agreement m = valor modelado o = valor observado</p>	Quanto mais próximo ao valor de 1 melhor a concordância entre valores simulados e observados.	Willmott (1982)
<i>Hit rate</i>	<p>Calcula porcentagem de valores que foram simulados dentro de um determinado intervalo pré-estabelecido em torno dos correspondentes valores observados.</p> <p>O intervalo pré-estabelecido no estudo foi de 2 unidades para mais ou para menos.</p>	$H = \frac{100}{m} \times \sum_{i=1}^m n_i$ <p>Onde H = hit rate m = número de dados de comparação</p>	<p>Valor em porcentagem variando de:</p> <p>(a) 100%, situação quando todos os valores simulados estiverem dentro do intervalo pré-estabelecido; e</p> <p>(b) 0%, situação em que nenhum valor simulado estiver dentro do intervalo pré-estabelecido.</p>	Schlünzen e Katzfey (2003)

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO ESTUDO

Nome	Órgão responsável	Altura de medição	Intervalo de registro de médias das medidas	Localização (Lat/Lon)
Capão Redondo	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,6683561444/-46,7800433837
Carapicuíba	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,531395027/-46,8357797277
Parelheiros	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,7762659831/-46,6969610784
Guarulhos-Paço Municipal	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,4555342568/-46,5185334031
Interlagos	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,6805076499/-46,6750431583
Jacareí	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,2941992422/-45,9682338642
Marginal Tietê-Ponte dos Remédios	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,5187058297/-46,7433200409
Pinheiros	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,5614598934/-46,7020165085
Taboão da Serra	CETESB	Variável dentro do dossel urbano	1 h	-23,6093238629/-46,7582943679
EM-IAG-USP	IAG-USP	2 m	1h	-23,6512/-46,6224
Riacho Grande	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,752079/-46,532528
Vila Mariana	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,58472/-46,63556
Sé-CGE	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,552718/-46,656168
Sé-Anhembi	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,518626/-46,643757
Perus	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,407443/-46,753125
Parelheiros	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,8677777778/-46,6522222222
Freguesia do Ó	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,47706/-46,66537
Santana/Tucuruvi	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,511211/-46,619502
Pirituba	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,488606/-46,727320
Vila Prudente	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,583219/-46,560179
Vila Maria/Vila Guilherme	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,501611/-46,591534
Ipiranga	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,632978/-46,583518
Butantã	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,55451644933218/-46,72657012939453
São Mateus	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,594199/-46,465567
Lapa	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,52556/-46,75083
M Boi Mirim	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,671266/-46,727361

Santo Amaro	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,634789/-46,667657
Campo Limpo	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,65818/-46,76749
Capela do Socorro	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,781133/-46,725217
Aricanduva-Vila Formosa	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,563309/-46,508798
Mooca	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,53/-46,59167
São Miguel Paulista	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,491511/-46,453618
Itaquera	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,552301/-46,446110
Itaim Paulista	CGE	Variável dentro do dossel urbano	10 min	-23,49067/-46,43599