



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto de Geografia

Lidiane de Oliveira Lemos

**Configuração térmica horizontal e vertical do clima urbano do
Central Business District (CBD) da cidade do Rio de Janeiro (RJ)**

Rio de Janeiro

2021

Lidiane de Oliveira Lemos

Configuração térmica horizontal e vertical do clima urbano do *Central Business District* (CBD) da cidade do Rio de Janeiro (RJ)

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Gestão e Estruturação do Espaço Geográfico.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Oscar Júnior

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

L557 Lemos, Lidianne de Oliveira.
Configuração térmica horizontal e vertical do clima urbano do Central
Business District (CBD) da cidade do Rio de Janeiro (RJ) / Lidianne de Oliveira
Lemos. – 2021.
218 f.: il.

Orientador: Antonio Carlos Oscar Júnior.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Instituto de Geografia.

1. Geografia Humana – Análise térmica – Avenida Rio Branco (Rio de
Janeiro, RJ) – Teses 2. Morfologia urbana – Centro Comercial – Rio de Ja-
neiro (RJ) – Teses. 3. Climatologia urbana – Rio de Janeiro (RJ) – Teses. 4.
Metereologia – Ilha de calor – Teses. I. Oscar Júnior, Antonio Carlos. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Geografia. III. Título.

CDU 911.3:551.5(815.3)

Bibliotecário Responsável: Fernanda Lobo / CRB-7:5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total
ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Lidiane de Oliveira Lemos

Configuração térmica horizontal e vertical do clima urbano do *Central Business District* (CBD) da cidade do Rio de Janeiro (RJ)

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Gestão e Estruturação do Espaço Geográfico.

Aprovada em 15 de Junho de 2021

Orientador: Antonio Carlos Oscar Júnior

Instituto de Geografia – UERJ

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco de Assis Mendonça
Instituto de Geografia – UERJ

Prof. Dra. Cássia de Castro Martins Ferreira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. António Manuel Saraiva Lopes
Universidade de Lisboa

Rio de Janeiro

2021

AGRADECIMENTOS

Esses dois anos de mestrado envolveram muito estudo, esforço e dedicação. Não foi uma tarefa fácil chegar até aqui, mas com muita persistência concluo mais uma etapa da minha jornada. Não cheguei até aqui sozinha! Jamais teria conseguido realizar este sonho se não fosse a ajuda de pessoas fundamentais que contribuíram para esta conquista. Divido com todos vocês essa minha vitória! Por isso, expresso aqui minha gratidão.

Primeiramente, agradeço à minha esposa Caroline Cordeiro, por me incentivar e me dar forças, compreendendo a minha ausência em muitos momentos e minha desatenção. Obrigada pelo profundo apoio neste processo árduo. Minha companheira de vida: TE AMO!

À minha mãe, Sandra Maria de Oliveira, por sempre acreditar em mim e pelo carinho, dedicação e fé nas minhas realizações.

Ao meu orientador, Antonio Carlos Oscar Júnior, por todo o suporte durante estes últimos anos, por toda paciência e companheirismo. Obrigada por toda a troca!

Aos companheiros do grupo de pesquisa LISA pela disposição e suporte durante os cansativos trabalhos de campo em meio a uma pandemia, a contribuição de vocês foi essencial! Obrigada Marcelle Rodrigues, Lucas Honório, Luisa Martins, Rafaela Torres, Sérgio Lins, Caio Gabriel, Thalita de Almeida, Raiane Fontes, Bruno Soares, Pedro de Castro e Pedro Rangel.

Aos amigos, desde a graduação, que sempre dão aquela força: Ana Beatriz Farias, Edinaly dos Santos Freire, João Pedro Andrade e Luiz Ricardo Schiavinato.

Às professoras Cássia Ferreira, Marta Foeppel, António Lopes e Francisco Mendonça pelas valiosas contribuições ao longo desse processo.

Por fim, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa, através do Programa Bolsista Nota 10.

Eu não abaixo a cabeça, não vou te obedecer
Ser preto de estimação não, eu prefiro morrer
Sinhozinho eu troco soco nunca fui de correr (...)
(...) Suas palavras não vão me ofender
Apaga a luz tente me entender
Sinta a África pra me entender
Não tema a morte pra me entender
Enquanto 'cê tiver limite, não vai me entender
Todo líder negro é morto, 'cê consegue entender?
Tenho recebido cartas falando
O próximo é você, o próximo é você, o próximo é você
Agora eu te entendo Kanye, agora eu te entendo Kanye
Ser preto não é só ter pele
Coisa que joalheiro entende
A minha cultura é minha febre
Eu sou a explicação pra quem não sente

Baco Exu do Blues

RESUMO

LEMOS, Lidiane de Oliveira. *Configuração térmica horizontal e vertical do clima urbano do Central Business District (CBD) da cidade do Rio de Janeiro (RJ)*. 2021. 218 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

A pesquisa objetivou analisar a influência da morfologia urbana no desempenho térmico, horizontal e vertical, da atmosfera do *Central Business District* (CBD) do Rio de Janeiro. Para tanto, os procedimentos metodológicos envolveram três etapas: pré-campo, experimento de campo e pós-campo. Na etapa pré-campo, estimou-se a termografia de superfície terrestre (TST) do verão (2014 a 2019) e inverno (2013 a 2019) e confeccionou-se o mapa de suscetibilidade climática, o UC-AnMAP, partindo da consideração de critérios da morfologia urbana. A confrontação entre as TSTs e o UC-AnMAP trouxe à tona a divergência dos resultados encontrados para a Av. Rio Branco. Assim, para o experimento de campo optou-se pela ênfase ao *canyon* urbano da Av. Rio Branco a partir da coleta de dados em sete pontos através de dois transects móveis, uma estação meteorológica de controle instalada em área livre e gramada do Aeroporto Santos Dumont e verticais dos 50 metros iniciais da atmosfera urbana no Largo da Carioca, através de uma RPA. Dessa maneira, o experimento combinou coletas horizontais e verticais às 6, 13 e 20 horas, ao longo de dez dias de verão entre 24/1/21 e 15/3/21. O mapeamento do campo térmico horizontal na Av. Rio Branco avaliou que a morfologia urbana confere suscetibilidade à configuração de ilhas de calor (ICs), que apresentaram magnitudes que variaram segundo os distintos processos atmosféricos: muito forte (acima de 6,1°C) em situação de estabilidade; forte (4,1°C a 6°C) em situação de instabilidade; e moderada (2,1°C a 4°C) em situação de pós-instabilidade. O horário das 13 horas foi o concentrador das cores térmicas, em especial no cruzamento da Av. Rio Branco/Rua do Ouvidor, com maior verticalização, e Praça Mauá, com ausência de vegetação. Outro aspecto interessante é que as maiores cores em todo o experimento não coincidem com o dia (31/1 - domingo) de maior registro de temperatura do ar (29,5°C), mas uma segunda-feira. Nessa segunda-feira, as ICs registraram 11,8°C na Av. Rio Branco/Rua do Ouvidor e 8,3°C na Praça Mauá. Possivelmente o calor antrópico tenha contribuído para a formação destes núcleos, reforçando a importância não apenas da forma urbana, mas do ritmo das funções urbanas. Por fim, para análise vertical, o horário das 13 também foi o que apresentou temperaturas mais elevadas e maiores gradientes do chão até 50 metros. Houve indícios de inversão térmica, porém, foi no horário noturno, do dia de maior registro de temperatura do ar (29,5°C), que em 50 metros a temperatura do ar foi 2,3°C superior ao nível do chão. Esse resultado, quando confrontado ao monitoramento de radiossondagem do aeroporto do Galeão, sem ocorrência de inversão térmica, indica que, possivelmente, a rugosidade e o volume de edificações presentes no Largo da Carioca podem ter forçado a configuração do fenômeno, revelando, talvez, um novo processo gerador de inversões.

Palavras-chaves: Campo térmico. Estrutura tridimensional. Ilhas de calor. Cânion urbano. Inversão térmica.

ABSTRACT

LEMOS, Lidiane de Oliveira. *Horizontal and vertical thermal configuration of the urban climate of the Central Business District (CBD) of the city of Rio de Janeiro (RJ)*. 2021. 218 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

This research aimed to analyze the influence of urban morphology on the thermal field, horizontal and vertical, at atmosphere of Central Business District (CBD) of Rio de Janeiro. Therefore, the methodological procedures involved three stages: pre-field, field experiment and post-field. In the pre-field stage, the mean of land surface temperature (LST) in the summer (2014 to 2019) and winter (2013 to 2019) was estimated and was prepared the urban climate susceptibility map, the UC-AnMAP, based on urban morphology. The confrontation between the LSTs and the UC-AnMAP brought to light the divergence of the results for Rio Branco avenue. Thus, for the field experiment, emphasize was given to the urban canyon of Rio Branco avenue by collecting data at seven points through two mobile transects, a meteorological control station in a free and grassed area at Santos Dumont Airport and vertical collections at Largo da Carioca with RPA, used to evaluate the vertical thermal profile of the initial 50 meters of the urban atmosphere. In this way, the field experiment combined horizontal and vertical collections at 6, 13 and 20 hours, which took place over ten summer days between 1/24/21 and 3/15/21. The mapping of the horizontal thermal field of the Rio Branco avenue, assessed that the urban morphology confers susceptibility to the configuration of heat islands that presented magnitudes that varied according to the different atmospheric processes: very strong (above than 6.1°C) in stable conditions; strong (4.1°C to 6°C) in unstable conditions; and moderate (2.1°C to 4°C) in post-instability conditions. The field data showed that the 13:00 happened the heat concentration, especially at the intersection of Av. Rio Branco/Rua do Ouvidor, with greater verticalization, and Praça Mauá, without vegetation. Another interesting aspect is that highest heat island intensity in the entire field experiment do not coincide with day (1/31 - Sunday) of highest recorded air temperature (29.5°C), but on a Monday. This Monday, the heat islands registered anomalies of 11.8°C at Av. Rio Branco/Rua do Ouvidor, and 8.3°C at Praça Mauá. Possibly the anthropic heat has contributed to the formation of these nuclei, which reinforces the importance not only of urban form, but of the rhythm of urban functions. Finally, for vertical analysis, the 13:00 pm time was also the one with the highest temperatures and highest gradients from the ground up to 50 meters. In the different synoptic conditions there were indicatives of thermal inversion, however, it was at night of the day with the highest air temperature (29.5°C), that the air temperature in 50 meters was 2.3°C higher than ground. This result, when compared to the Galeão airport radiosonde monitoring, without occurrence of thermal inversion, indicates that, possibly, the roughness and volume of buildings present in the Rio Branco canyon may have forced the configuration of the phenomenon, revealing, perhaps, a new process that generates inversions.

Keywords: Thermal field. Three-dimensional structure. Heat islands. Urban canyon. Thermal inversion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estrutura vertical da atmosfera urbana.....	30
Figura 2 –	Subdivisão vertical da “ <i>urban boundary layer</i> ”	31
Figura 3 –	Espacialização das isotermas.....	35
Figura 4 –	Tipos de ilhas de calor urbana.....	38
Figura 5 –	Morfologia da ilha de calor clássica.....	39
Figura 6 –	Morfologia da ilha de calor não clássica.....	40
Figura 7 –	Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	51
Figura 8 –	Fluxograma de construção do UC-AnMap.....	64
Figura 9 –	Fluxograma de elaboração do Mapa de Análise Climática Urbana.....	73
Figura 10 –	Termo-anemômetro.....	76
Figura 11 -	Estação meteorológica.....	76
Figura 12 -	<i>Datalogger</i>	76
Figura 13 -	RPA <i>Gkalione x487 ultra 2020</i>	76
Figura 14 -	RPA da série DJI GO <i>phanton 4</i>	76
Figura 15 -	TST média do verão no CBD do Rio de Janeiro.....	82
Figura 16 -	Temperatura média da superfície do verão no CBD.....	82
Figura 17 -	Zoneamento urbano no CBD do Rio de Janeiro.....	83
Figura 18 -	TST média do inverno no CBD do Rio de Janeiro.....	85
Figura 19 -	Temperatura média da superfície do inverno no CBD.....	85
Figura 20 -	Mapa de volume edificado no CBD.....	87
Figura 21 -	Mapa de ganhos antropogênicos no CBD.....	89
Figura 22 -	Mapa de altura topográfica no CBD.....	91
Figura 23 -	Mapa de efeitos bioclimáticos no CBD.....	93
Figura 24 -	Mapa de cobertura do solo por edificação no CBD.....	95
Figura 25 -	Mapa de rugosidade das formas vegetais no CBD.....	97
Figura 26 -	Mapa de declividade no CBD.....	99
Figura 27 -	Mapa de orientação das encostas no CBD.....	101
Figura 28 -	Mapa de comprimento de rugosidade no CBD.....	103
Figura 29 -	Mapa de carga térmica no CBD.....	105

Figura 30 -	Mapa de potencial dinâmico no CBD.....	107
Figura 31 -	Mapa de Análise Climática Urbana do CBD.....	109
Figura 32 -	Distribuição dos pontos de medição dos transectos 1 e 2.....	113
Figura 33 -	Pontos de medidas e seus entornos no raio de 250 metros.....	114
Figura 34 -	Distribuição do ponto de medição da RPA e da estação meteorológica.....	115
Figura 35 -	Estação de controle e ponto de levantamento da RPA e seus entornos no raio de 250 metros.....	116
Figura 36 -	Campo térmico no dia 24/01/2021.....	131
Figura 37 -	Campo térmico no dia 25/01/2021.....	132
Figura 38 -	Campo térmico no dia 31/01/2021.....	133
Figura 39 -	Campo térmico no dia 14/03/2021.....	134
Figura 40 -	Campo térmico no dia 15/03/2021.....	135
Figura 41 -	Campo térmico no dia 14/02/2021.....	144
Figura 42 -	Campo térmico no dia 22/02/2021.....	145
Figura 43 -	Campo térmico no dia 07/03/2021.....	146
Figura 44 -	Campo térmico no dia 07/02/2021.....	153
Figura 45 -	Campo térmico no dia 21/02/2021.....	154
Figura 46 -	Perfil térmico horizontal ao longo do canyon urbano da Avenida Rio Branco.....	157

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 24/01/2021.....	120
Gráfico 2 –	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 24/01/2021.....	120
Gráfico 3 –	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 24/01/2021.....	120
Gráfico 4 –	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 25/01/2021.....	121
Gráfico 5 –	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 25/01/2021.....	121
Gráfico 6 –	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 25/01/2021.....	121
Gráfico 7 –	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 31/01/2021.....	122
Gráfico 8 –	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 31/01/2021.....	122
Gráfico 9 –	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 31/01/2021.....	122
Gráfico 10 -	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 14/03/2021.....	123
Gráfico 11 -	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 14/03/2021.....	123
Gráfico 12 -	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 14/03/2021.....	123
Gráfico 13 -	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 15/03/2021.....	124
Gráfico 14 -	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 15/03/2021.....	124
Gráfico 15 -	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 15/03/2021.....	124

Gráfico 16 -	Taxa de aquecimento no dia 24/01/2021.....	131
Gráfico 17 -	Temperatura vertical às 6h no dia 24/01.....	131
Gráfico 18 -	Temperatura vertical às 13h no dia 24/01.....	131
Gráfico 19 -	Temperatura vertical às 20h no dia 24/01.....	131
Gráfico 20 -	Umidade vertical às 6h no dia 24/01.....	131
Gráfico 21 -	Umidade vertical às 13h no dia 24/01.....	131
Gráfico 22 -	Umidade vertical às 20h no dia 24/01.....	131
Gráfico 23 -	Taxa de aquecimento no dia 25/01/2021.....	132
Gráfico 24 -	Taxa de aquecimento no dia 31/01/2021.....	133
Gráfico 25 -	Temperatura vertical às 6h no dia 31/01.....	133
Gráfico 26 -	Temperatura vertical às 20h no dia 31/01.....	133
Gráfico 27 -	Umidade vertical às 6h no dia 31/01.....	133
Gráfico 28 -	Umidade vertical às 20h no dia 31/01.....	133
Gráfico 29 -	Taxa de aquecimento no dia 14/03/2021.....	134
Gráfico 30 -	Temperatura vertical às 6h no dia 14/03/2021.....	134
Gráfico 31 -	Temperatura vertical às 13h no dia 14/03/2021.....	134
Gráfico 32 -	Umidade vertical às 6h no dia 14/03.....	134
Gráfico 33 -	Umidade vertical às 13h no dia 14/03.....	134
Gráfico 34 -	Taxa de aquecimento no dia 15/03/2021.....	135
Gráfico 35 -	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.....	138
Gráfico 36 -	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.....	138
Gráfico 37 -	Chuva horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.....	138
Gráfico 38 -	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.....	138
Gráfico 39 -	Temperatura horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.....	139
Gráfico 40 -	Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.....	139
Gráfico 41 -	Chuva horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.....	139
Gráfico 42 -	Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.....	139

Gráfico 43 – Temperatura horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.....	140
Gráfico 44 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.....	140
Gráfico 45 – Chuva horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.....	140
Gráfico 46 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.....	140
Gráfico 47 – Taxa de aquecimento no dia 14/02//2021.....	144
Gráfico 48 – Taxa de aquecimento no dia 22/02//2021.....	145
Gráfico 49 – Taxa de aquecimento no dia 07/03/2021.....	146
Gráfico 50 – Temperatura vertical às 6h no dia 07/03.....	146
Gráfico 51 – Temperatura vertical às 13h no dia 07/03.....	146
Gráfico 52 – Temperatura vertical às 20h no dia 07/03.....	146
Gráfico 53 – Umidade vertical às 6h no dia 07/03.....	146
Gráfico 54 – Umidade vertical às 13h no dia 07/03.....	146
Gráfico 55 – Umidade vertical às 20h no dia 07/03.....	146
Gráfico 56 – Temperatura horária da estação meteorológica no dia 07/02/2021.....	149
Gráfico 57 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 07/02/2021.....	149
Gráfico 58 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 07/02/2021.....	149
Gráfico 59 – Temperatura horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.....	150
Gráfico 60 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.....	150
Gráfico 61 – Chuva horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.....	150
Gráfico 62 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021139.....	150
.....	
Gráfico 63 – Taxa de aquecimento no dia 07/02/2021.....	153
Gráfico 64 – Temperatura vertical às 6h no dia 07/02.....	153
Gráfico 65 – Temperatura vertical às 13h no dia 07/02.....	153

Gráfico 66 –	Temperatura vertical às 20h no dia 07/02.....	153
Gráfico 67 –	Umidade vertical às 6h no dia 07/02.....	153
Gráfico 68 –	Umidade vertical às 13h no dia 07/02.....	153
Gráfico 69 –	Umidade vertical às 20h no dia 07/02.....	153
Gráfico 70 –	Taxa de aquecimento no dia 21/02/2021.....	154
Gráfico 71 –	Temperatura vertical às 6h no dia 21/02.....	154
Gráfico 72 –	Temperatura vertical às 13h no dia 21/02.....	154
Gráfico 73 –	Temperatura vertical às 20h no dia 21/02.....	154
Gráfico 74 –	Umidade vertical às 6h no dia 07/02.....	154
Gráfico 75 –	Umidade vertical às 13h no dia 21/0250.....	154
Gráfico 76 –	Umidade vertical às 20h no dia 21/02.....	154

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Categorias taxonômicas da organização geográfica do clima e suas articulações com o clima urbano.....	29
Quadro 2 –	Variação média local dos elementos climáticos produzidos pela urbanização.....	32
Quadro 3 –	Articulação dos canais de percepção e os subsistemas do sistema clima urbano (SCU).....	34
Quadro 4 –	Variáveis responsáveis pela configuração e regulação da ilha de calor.....	37
Quadro 5 –	Elementos e valores de conversão de ND's para radiância espectral TOA.....	57
Quadro 6 –	Elementos necessários para a eliminação de ruídos na atmosfera.....	58
Quadro 7 –	Elementos e valores de conversão de ND's para reflectância e correção TOA.....	61
Quadro 8 –	Elementos e valores para TST em Kelvin.....	61
Quadro 9 –	Camadas utilizadas e seus respectivos efeitos sobre o clima urbano.....	64
Quadro 10 –	Categorização do UC-AnMap a partir dos efeitos da CT e PD.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Características do satélite LANDSAT-8.....	54
Tabela 2 –	Relação das imagens LANDSAT-8/sensor TIRS/banda 10.....	56
Tabela 3 –	Dados de entrada e saída para a correção dos efeitos da atmosfera sobre a radiação.....	59
Tabela 4 –	Estimativa da emissividade usando o NDVI.....	60
Tabela 5 –	Probabilidade de formação de tormenta com o índice K.....	79
Tabela 6 –	Probabilidade de formação de tormenta com o índice CAPE.....	80
Tabela 7 –	Probabilidade de formação de tormenta com o índice TT.....	80
Tabela 8 –	Índices termodinâmicos em situação de equilíbrio estável.....	118
Tabela 9 –	Índices termodinâmicos em situação de equilíbrio instável.....	136
Tabela 10 –	Índices termodinâmicos em situação de pós-instabilidade.....	147

LISTA DE ABREVIACES E SIGLAS

CBD	<i>Central Business District</i>
CT	Carga térmica
ERTS	<i>Earth resources technology satellite</i>
ETM+	Enhanced thematic mapper plus
FF	Frente fria
GSFC	<i>Goddard Space Flight Center</i>
IAF	ndice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBI	ndice de área construída
ICU	Ilha de calor urbana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPP	Instituto Pereira Passos
ISA	rea impermeável da superfície
IVDN	<i>Normalized difference vegetation index</i>
LANDSAT	<i>Land remote sensing satellite</i>
MDT HC	Modelo digital de terreno hidrologicamente consistente
NASA	<i>National Aeronautics e Space Administration</i>
NCEP	Centro Nacional de Previso Ambiental
NDBI	rea construída por diferença normalizada
NIR	Infravermelho próximo
NS's	Números digitais
NDVI	ndice de vegetação por diferença normalizada
OLI	Operational terra imager
PAN	Pancromática
PD	Potencial dinâmico
PDI	Processamento de imagem digital
PET	Temperatura equivalente fisiológica
RED	Banda vermelha
RPA	Aeronave remotamente pilotada

RZCAS	Repercussão de ZCAS
SADMET	Seção de armazenamento de dados meteorológico
SAVI	Índice de vegetação ajustada ao solo
SCU	Sistema clima urbano
SLC	<i>Scan line correction</i>
SVF	<i>Sky view factor</i>
SWIR	Infravermelho médio
UBL	<i>Urban boundary layer</i>
UC-AnMap	Mapa de Análise Climática Urbana
UC-ReMap	Mapa de Recomendações de Planejamento Climático Urbano
UCL	<i>Urban canopy layer</i>
UCMap	Mapa de Análise Climática Urbana
UBLI	Ilha de calor da atmosfera superior
UCLI	Ilha de calor da atmosfera inferior
USGS	United States Geological Survey
TB	Temperatura de brilho
TCI	Índice de condição de temperatura
TIRS	<i>Thermal infrared sensor</i>
TM	<i>Landsat thematic mapper</i>
TOA	Topo da atmosfera
TST	Temperatura da superfície terrestre
UTM	Universal transversa de Mercator
VANT's	Veículos aéreos não tripulados
VCI	Índice de condição de vegetação
WGS-84	<i>World geodetic system 1984</i>
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico Sul
ZCC	Zona consolidada central
ZCS	Zona comercial e de serviços
ZOE	Zona de operações especiais
ZRM-2	Zona residencial multifamiliar-2
ZUM	Zona de uso misto

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	20
1	OBJETIVOS	24
1.1	Objetivo Geral	24
1.2	Objetivos Específicos	24
2	PRESSUPOSTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS	25
2.1	Clima urbano: um constructo social	25
2.2	Dimensões associadas ao clima urbano	28
2.3	Ilha de calor: principal <i>output</i> do clima urbano	34
2.4	Métodos de observação das ilhas de calor	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	Primeira etapa: pré-campo	53
3.1.1	<u>A missão LANDSAT-8 e a seleção dos dados TIRS</u>	53
3.1.1.1	Estimativa da termografia de superfície terrestre (TST)	56
3.1.2	<u>Mapa de Análise Climática Urbana (UC-AnMap)</u>	62
3.1.3	<u>Definição dos pontos de coletas de dados</u>	74
3.2	Segunda etapa: experimento de campo	74
3.3	Terceira etapa: pós-campo	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	Termografia da superfície terrestre	81
4.2	Caracterização da suscetibilidade climática urbana	86
4.3	Seleção dos pontos amostrais	110
4.4	Experimento de campo	117
4.4.1	<u>Campo térmico em situação sinótica de estabilidade atmosférica</u>	118
4.4.1.1	Configuração térmica horizontal e vertical em situação de estabilidade...	125
4.4.2	<u>Campo térmico em situação sinótica de instabilidade atmosférica</u>	136
4.4.2.1	Configuração térmica horizontal e vertical em situação de instabilidade..	141
4.4.3	<u>Campo térmico em situação sinótica de pós-instabilidade</u>	147
4.4.3.1	Configuração térmica horizontal e vertical em situação de pós- instabilidade.....	151
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	155

REFERÊNCIAS	161
APÊNDICE A – Distribuição dos pontos amostrais da proposta inicial do experimento de campo, ao longo dos transectos.....	175
APÊNDICE B – Localização dos pontos experimentais do transecto 1....	176
APÊNDICE C – Localização dos pontos experimentais do transecto 2....	177
APÊNDICE D – Localização dos pontos experimentais do transecto 3....	178
APÊNDICE E – Localização dos pontos experimentais do transecto 4....	179
APÊNDICE F– Localização dos pontos experimentais do transecto 5.....	180
APÊNDICE G – Distribuição dos pontos de controle e levantamento das RPA's.....	181
APÊNDICE H – Localização dos pontos de controle e levantamento das RPA's.....	182
APÊNDICE I – Galeria de foto dos pontos do transecto 1.....	183
APÊNDICE J – Galeria de foto dos pontos do transecto 2.....	184
APÊNDICE K – Estação meteorológica.....	185
APÊNDICE L – Galeria de foto do Largo da Carioca.....	186
APÊNDICE M – Tutorial: correção atmosférica no <i>software arcgis</i> 10.5 com imagem orbital landsat-8 – Temperatura de superfície.....	188
APÊNDICE N – Tutorial: índice de área foliar no <i>software arcgis</i> 10.5 com imagem orbital landsat-8.....	195
APÊNDICE O – Tutorial: interpolador topo to raster no <i>software arcgis</i> 10.5 – MDT HC.....	198
APÊNDICE P – Tutorial: slope no <i>software arcgis</i> 10.5 – Declividade das vertentes.....	203
APÊNDICE Q – Tutorial: <i>aspect</i> no <i>software arcgis</i> 10.5 – Orientação da declividade.....	205
ANEXO A – Cartas sinóticas, imagens GOES 16 e radiossondas das situações de estabilidade atmosférica.....	207
ANEXO B – Cartas sinóticas, imagens GOES 16 e radiossondas das situações de instabilidade atmosférica.....	212
ANEXO C – Cartas sinóticas, imagens GOES 16 e radiossondas das situações de pós-instabilidade atmosférica.....	215
ANEXO D – Certificados de calibração.....	217

INTRODUÇÃO

No final do século XX o ser humano passou a viver, cada vez mais, de modo intensamente aglomerado. Os espaços urbanos tornaram-se por excelência o lugar do homem na Terra - o seu habitat (MONTEIRO, 1990). Essa realidade, direcionada pela estrutura social reinante, pavimentou caminhos de modo a unir a **questão urbana à climática**.

A conversão das coberturas naturais (formas geoecológicas) em coberturas e usos antrópicos, associados a uma nova organização espacial (urbana), promovem grandes pressões sobre o ambiente, implicando em uma série de derivações sistêmicas. Em fato, a cidade é um espaço construído extremamente artificial, dado o predomínio das formas urbanas (canalização dos corpos hídricos, pavimentações asfálticas, equipamentos e construções). A presença dos fatores geoecológicos não desaparece, embora sejam drasticamente reduzidos.

Segundo Landsberg (1981), como resultante das transformações que a urbanização gera nas formas da superfície, ocorrem alterações no balanço de energia, engendrando espaços climáticos locais específicos: o clima urbano. Ao receber energia do ambiente maior ao qual se insere (regional), o sistema clima urbano a transforma substancialmente, seguindo uma mobilidade têmporo-espacial, tanto vertical como horizontal, a ponto de gerar produtos e externá-los (MONTEIRO, 1976). Ou seja, os impactos promovidos pela estrutura social acabam retornando sobre si mesma.

Algumas evidências do clima urbano são observadas no canal termodinâmico (campo térmico), sobretudo, pelas derivações do calor, umidade e vento. Esse canal atravessa toda a sua estrutura, pois é o insumo básico transformado na cidade em que suas funções estão intimamente ligadas ao processo de transformação do sistema (MONTEIRO, 2015).

Dentre os agravos, a remoção da cobertura vegetal e as impermeabilizações, reduzem as trocas térmicas advindas do calor latente (armazenado na molécula de água). Por outro lado, ampliam-se as trocas térmicas associadas ao calor sensível (sentido pelo corpo humano). Isso decorre da maior capacidade de absorção e armazenamento de energia das formas urbanas.

Também a disposição das formas edificadas, desenhando *canyons* urbanos, além de serem obstáculos aos ventos, contribui para o aprisionamento das radiações de ondas longas, retroalimentadas pelo calor interno das construções. Soma-se a esse cenário, o calor antropogênico dos fluxos e funções urbanas.

Portanto, podemos relacionar a questão climática ao modo de produção do próprio espaço urbano, cujo planejamento é conduzido pelo modelo econômico de base concentradora e excludente, em virtude da sobreposição do valor de troca ao de uso¹ (LEFEBVRE, 1978) e sem preocupações com as questões ambientais. Para Santos (1994), o espaço urbano construído é retrato da diversidade das classes, das diferenças de renda e dos modelos culturais. Nesse sentido, pode-se pensar que a mudança no campo térmico e a configuração da ilha de calor são resultantes deste caráter segregador e fragmentador de ordenamento do espaço, que possuem suas particularidades quanto ao planejamento, arborização e acessos à urbanidade.

O *Central Business District* (CBD) do Rio de Janeiro é uma rugosidade² (SANTOS, 2014a). Do limiar de sua constituição até o hodierno, o processo histórico de ocupação e produção de seu espaço fez-se à custa de sucessivos aterros de pântanos, lagunas e manguezais; demolições de morros; redesenho de orla e avanços sobre a floresta. Originando, assim, paisagens singulares onde as formas urbanas coexistem em complexidade e sobrepõem tempos históricos: a geometria dos *canyons* urbanos dialoga com espaços antigos e deteriorados, de função comercial, administrativa, financeira, cultural, informacional e residencial. Portanto, é onde as atividades humanas se revestem de maior intensidade e diversidade, evidenciando o fluxo intenso de veículos e pessoas, a concentração de edifícios e equipamentos, novas formas topográficas, produção artificial de calor, impermeabilizações e reduções da vegetação, expressão máxima da dialética sociedade e natureza.

¹ Segundo Lefebvre, o urbano (fenômeno qualitativo) é marcado pela sobreposição do valor de troca sobre o uso. Isso emana da crise provocada pelo crescimento quantitativo da economia por meio da industrialização. Assim, o espaço passa a ser consumido sob uma lógica mercantilizada, sendo a cidade organizada pela lógica do dinheiro. Isso quer dizer que, o espaço assume um valor de troca em detrimento do valor de uso, que é definido pela capacidade de satisfazer as necessidades humanas.

² Milton Santos (2014a) designa rugosidade a sobreposição de tempos históricos, materializada pelas formas urbanas, que coexistente na paisagem. No CBD, esse diálogo espaço-tempo é bem evidente, como por exemplo, no Largo da Carioca, que apresenta formas do período colonial (Convento de Santo Antônio) e formas contemporâneas (Petrobrás e Banco Nacional de Desenvolvimento Social (BNDS)).

Essa magnitude (de formas) da segunda natureza em detrimento da natureza primitiva, garantida, sobretudo, pela associação do poder público ao capital privado (BARROS, 2005), é responsável pela criação de um quadro ambiental crítico que aflora em resposta ao distúrbio provocado no balanço termo-higrométrico (BRANDÃO, 1996). Em estudos de comparação de tendências térmicas (média compensada, máxima e mínima), de médias decenais (mensais, sazonais e anuais) e normais climatológicas, abrangendo dados de 1851 a 1990, Brandão (1992) apontou para tendência de aquecimento na estação meteorológica (estação Aterro do Flamengo) da core área, sobretudo, a partir dos anos 1960 devido ao ordenamento da urbanização.

Esse resultado traz a necessidade de aprofundar as investigações do clima urbano do CBD, para além da abordagem temporal. Isto é, sob análise **têmporo-espacial**, a qual é capaz de **revelar a influência das várias possibilidades de articulações dos componentes geoecológicos** (altura topográfica, declividade, orientação das vertentes, efeito bioclimático e rugosidade das formas vegetais) e **urbanos** (cobertura e uso do solo³, ganhos antropogênicos, volume edificado e rugosidade) **sobre a variabilidade térmica horizontal e vertical** (*urban canopy layer* - UCL) do clima urbano (MONTEIRO, 1976; 1990).

Salienta-se que, diversos estudos hoje têm aplicado recursos (medições *in situ* e imagens de satélites, por exemplo) que não dão conta da **complexidade tridimensional** de transmissão e armazenamento de calor da atmosfera urbana. Deixando, portanto, lacunas quanto à sua compreensão.

Significativa é a contribuição da tese de Brandão (1996) que ensaia no CBD tal abordagem. Horizontalmente, os núcleos mais quentes manifestaram-se às 18 horas (4,4°C) e estiveram associados aos eixos mais verticalizados (*sky view factor* - SVF entre 60% e 88%), marcando a influência da geometria dos *canyons* urbanos no armazenamento de energia. Verticalmente, inversões térmicas foram detectadas nos baixos níveis da atmosfera contribuindo para acentuar os níveis de poluição do ar. Contudo, cabe ressaltar que os resultados correspondem a um único episódio de inverno (03 de agosto de 1995).

Nesse sentido, corroborando com Monteiro (1976; 1990), assume-se a perspectiva de adentrar o espaço urbano do *Central Business District* para tomar-lhe

³ Segundo Deus e Oscar Júnior (2020), a terminologia uso do solo é adotada pela legislação urbanística para fins de ordenamento territorial, em escala local, do solo urbano.

o campo térmico, em suas variações espaciais e temporais, tanto horizontal como vertical, em diferentes situações sinóticas, a partir de técnicas e metodologias que busquem responder os seguintes questionamentos:

- a) como a morfologia urbana do *Central Business District* condiciona o surgimento de áreas suscetíveis à ocorrência de ilhas de calor?
- b) como as formas urbanas do CBD (e funções correlatas) interferem na variabilidade da temperatura de superfície, tanto no verão quanto no inverno?
- c) como as formas urbanas (e funções correlatas) influenciam no contraste térmico espacial do *canyon* da Avenida Rio Branco?
- d) como as formas urbanas (e funções correlatas) interferem na variação térmica vertical da atmosfera intra-urbana (*urban canopy layer*) do *canyon* da Avenida Rio Branco?
- e) quais as condições sinóticas, durante o verão, são propícias à manifestação da ilha de calor urbana no *canyon* da Avenida Rio Branco?
- f) quais espaços são considerados críticos em relação ao aquecimento?

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da morfologia urbana na configuração térmica horizontal e vertical (*urban canopy layer*), do clima urbano do *Central Business District* do Rio de Janeiro (RJ).

1.2 Objetivos Específicos

- a) Mapear as áreas suscetíveis à ocorrência de ilhas de calor, considerando os efeitos da morfologia urbana do CBD;
- b) executar a termografia de superfície do *Central Business District*, durante o verão e inverno;
- c) identificar espaços para o levantamento de dados e análise microclimática tridimensionais (dimensões horizontal e vertical da *urban canopy layer*) do clima urbano do CBD;
- d) traçar a configuração têmporo-espacial térmica do *canyon* da avenida Rio Branco, sob diferentes situações atmosféricas em episódios de verão (2021);
- e) traçar a configuração térmica vertical da atmosfera urbana inferior do *canyon* da avenida Rio Branco em situações atmosféricas distintas durante episódios de verão (2021);
- f) definir as situações padrão (tipos de tempo – formas/funções urbanas) de formação de condições propícias à manifestação de diferentes intensidades de ilha de calor;
- g) identificar os espaços de maior eficiência de conservação de energia (espaços críticos).

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS

Este capítulo oferece ao leitor o conhecimento teórico-conceitual construído na área de Climatologia Urbana, partindo de contribuições científicas com a ajuda dos quais se fundamentou a presente dissertação.

2.1 Clima urbano: um constructo social

Um conceito básico é que o espaço constitui uma realidade objetiva, um produto social em permanente processo de transformação. O espaço impõe sua própria realidade; por isso a sociedade não pode operar fora dele. Consequentemente para compreender o espaço, cumpre apreender a relação com a sociedade, pois é ela que dita os efeitos da compreensão dos processos⁴ (tempo e mudança) e especificam as noções de forma⁵, função⁶ e estrutura⁷, elementos fundamentais da produção do espaço (...) (SANTOS, 2014a).

A cidade, expressão material das sociedades sobre a paisagem, sofreu alterações significativas em sua função, forma e organização através dos séculos. O advento industrial ao mesmo tempo em que rompeu e desarticulou o passado sedentário e agrário, consolidou não só a cidade enquanto o espaço habitado (ecumênico), mas também uma nova realidade social: a urbana⁸.

A imposição da sociedade urbana no mundo contemporâneo, em nível global, só pode ser concebida ao final da industrialização, na medida em que a implosão-explosão das cidades, por ela impulsionada, culmina num ponto crítico capaz de explodir as formas tradicionais herdadas de transformações descontínuas

⁴ Ação que implica mudança ao longo do tempo.

⁵ Estrutura técnica e aspecto visível de um objeto, responsável por uma função. Constitui uma objetificação concreta da sociedade em seus termos de existência. Tão logo, também compreende o padrão espacial.

⁶ Atividade elementar de que a forma se reveste.

⁷ É a própria sociedade com suas características sociais, econômicas, políticas e culturais.

⁸ Compartilha-se da ideia de Lefebvre (1999) que extirpa a ambiguidade do termo urbano, indicando que não deve ser relacionado a qualquer cidade ou *city*. Mas sim, a sociedade que nasce e sucede a industrialização.

(crises, novos elementos e relações) (LEFEBVRE, 1999). Paralelamente, a problemática originada do processo industrial é profundamente deslocada e modificada, edificando a realidade urbana; agora dominante e indutora (LEFEBVRE, 1976; 1978; 1999).

Quando a totalidade social muda (economia, política, relações sociais e cultura), a cada período histórico (outro nome para a história da produção ou da divisão do trabalho), as formas (tanto as novas como as velhas) assumem novas funções (segundo a estrutura socioeconômica específica), assinalando nova organização espacial. Ou seja, o **espaço responde às alterações da sociedade por meio de sua própria mutação** (SANTOS, 2014a).

Nesse contexto, a realidade urbana introduz nova relação de produção. Torna-se a própria força produtiva. **O espaço e a política do espaço exprimem as relações sociais do processo produtivo (relações de classe)**, reagindo também sobre eles (LEFEBVRE, 1999). O que se constitui, segundo Lefebvre (1976), **é uma organização tempo-espaço diferencial**, manifestando-se por meio da separação das formas e funções, dos aspectos da prática social e da contradição centralidade-segregação generalizada.

Ao refletir também sobre a estrutura urbana, chegamos à natureza de suas formas, visto que a *“forma é a objetificação concreta da sociedade e de seus termos de existência”* (SANTOS, 2014a). O desenvolvimento tecnológico assimilado pela sociedade urbana proporciona o controle e a modificação dos elementos naturais; o homem não é mais um subordinado. Amplia-se, assim, a implementação de objetos que conferem o sentido de permanência e maior impacto.

Conforme afirma Santos (2014b), na medida em que o espaço torna-se habitado (urbano), transformações quantitativas e qualitativas se processam sobre o mesmo, desencadeando uma verdadeira metamorfose. Sobre os resquícios da natureza primitiva emerge uma paisagem tanto mais rígida, com **formas cada vez mais artificiais, instrumentalizadas, culturizadas, tecnificadas e trabalhadas segundo os ditames da ciência, acompanhadas, conseqüentemente, de atividades elementares a essa estrutura social**.

A complexidade e magnitude desta realidade urbana tornam-se tanto mais predatórias quanto mais as relações de produção evoluem (MENDONÇA, 2015). Conseqüentemente, os parâmetros naturais das formas superficiais são modificados em relação às propriedades radioativas, térmicas, aerodinâmicas e de umidade,

produzindo um clima próprio (o clima urbano). **Conclui-se, assim, que o clima urbano apresenta uma dinâmica social.**

Se o espaço urbano é produzido de maneira altamente complexa (novas formas e funções através do tempo, segundo a estrutura social) e expressando as relações sociais de produção (organização fortemente desigual). Se o clima é o produto da interação entre os processos dinâmicos da atmosfera e das ações dos agentes sociais, que ao produzirem novas territorialidades modificam as características fundamentais dos elementos climáticos. Então, a sociedade urbana, em seus distintos grupos, não experimenta nem percebe o tempo e o clima da mesma forma. Espaços desiguais potencializam efeitos do clima, igualmente desiguais. Nesta perspectiva temos que admitir que o clima urbano é uma construção social (SANT'ANNA NETO, 2012: 35-36).

Isso encontra relação nas diferentes maneiras de entrada na sociedade urbana. As implicações e consequências concernentes às problemáticas em muito dependem das características da sociedade considerada no curso da industrialização (diferenças iniciais) (LEFEBVRE, 1999).

Nos países do Sul, a expressiva industrialização, alimentada tardiamente pelas transnacionais, foi acompanhada por uma verdadeira revolução urbana, repleta de desigualdade de serviços e equipamentos. Bem como, muito mais sérios, foram acompanhados de dificuldades de produzir o seu espaço, ao passo que o Estado garantia, no lado oposto, o espaço ao/do capital (LEFEBVRE, 2008). Consequentemente, os problemas relacionados ao clima urbano são mais visíveis e perceptíveis por essa população (AMORIM, 2019).

Nas Regiões Metropolitanas brasileiras, por exemplo, o uso especulativo do solo urbano, o modelo de desenvolvimento excludente/concentrador e o planejamento urbano norteados por condicionantes econômicos e políticos em detrimento das questões ambientais, deslocam a população de baixa renda para as áreas periféricas, onde questões ligadas aos problemas de drenagens, saneamento básico, desmatamento, alta densidade demográfica e a utilização de materiais inadequados do ponto de vista térmico, criam uma espécie de “*cidade fora da cidade*” (ROLINK, 2008), marcada por um comportamento termo-hidrológico diferenciado.

Dessa maneira, “*o capital não somente produz o espaço em geral, mas também produz as reais escalas espaciais que dão ao desenvolvimento desigual a sua coerência*” (SMITH, 1988: 19). Produzindo, assim, alto grau de vulnerabilidade e riscos aos fenômenos climáticos para a população desses espaços. Como reflexo da

segregação socioespacial, as intempéries climáticas se encontram espacialmente localizadas.

2.2 Dimensões associadas ao clima urbano

O clima urbano é um sistema intrínseco a um dado espaço terrestre e sua urbanização; singular, aberto, evolutivo, dinâmico, adaptativo (MONTEIRO, 1976); de **caráter espacial-temporal**. Seu espaço climático encontra-se diretamente relacionado à coparticipação dos fatores naturais e antrópicos que, além de singularizarem ecossistemas, se processam sobre camada limite urbana, agindo no sentido de alterar o clima no nível local (BRANDÃO, 1996) (Quadro 1).

O fundamental a compreensão das relações entre clima e a sociedade deve emanar do reconhecimento de que:

- a. o comportamento atmosférico integrado às demais esferas e processos naturais, “organizam” espaços climáticos a partir das escalas superiores em direção às inferiores;
- b. a ação antrópica em derivar ou “alterar” essas organização ocorre no sentido inverso, ou seja, das escalas inferiores para as superiores. Em verdade, o homem tem capacidade de “criar” microclimas e alterar substancialmente os climas locais (como os “urbanos”) projetando sua ação direta até os espaços sub-regionais (MONTEIRO, 2001: 200).

Emerge, assim, como **produto da transformação do balanço de energia, a partir de um jogo holístico entre ar atmosférico e as formas urbanas**, modeladas e/ou construídas pelo ser humano (MONTEIRO, 1976). A cidade passa a armazenar, produzir e irradiar calor em magnitude e ritmo temporal que a torna peculiar e radicalmente diferenciada do ambiente circundante (GÓMEZ, 1993).

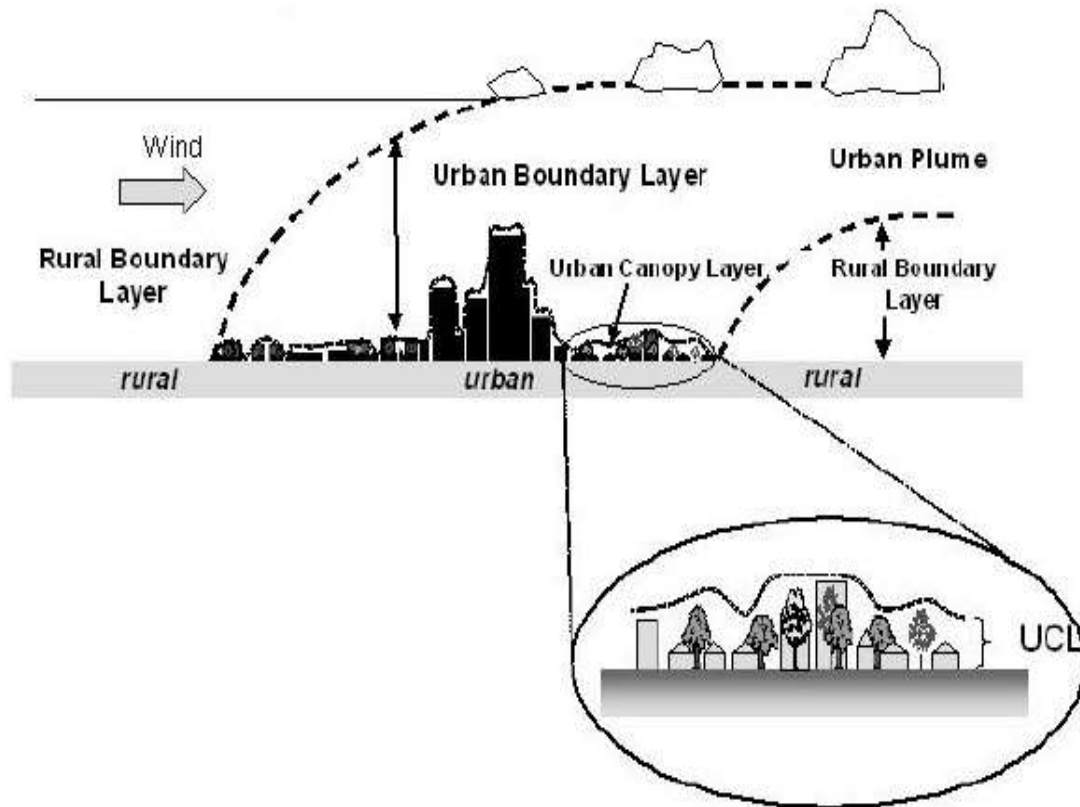
Quadro 1 - Categorias taxonômicas da organização geográfica do clima e suas articulações com o clima urbano.

Ordens de grandeza	Unidade de superfície	Escala cartográficas de tratamento	Espaços climáticos	Espaços urbanos	Estratégias de abordagens		
					Meios de observação	Fatores de organização	Técnicas de análise
II	(milhares de km)	1:45.000.000	Zonal	—	Satélite análises	Latitudes. Centro de ações atmosféricas	Categorização geral comparativa
		1:10.000.000					
III	(milhares de km)	1:5.000.000	Regional	—	Cartas sinóticas. Sondagens aerológicas	Sistemas meteorológicos (Circulação secundária)	Redes transectos
		1:2.000.000					
IV	(centenas de km)	1:10.000	Sub-regional	Megalópole. Grande área metropolitana	Rede meteorológica de superfície	Fatores geográficos	Mapeamento sistemático
		1:500.000					
V	(dezenas de km)	1:250.000	Local	Área metropolitana. Metrópole	Posto meteorológico. Rede complementar	Integração geoecológica. Ação antrópica	Análise espacial
		1:100.000					
VI	(centenas de metros)	1:50.000	Mesoclima	Cidade grande. Bairro ou subúrbio de metrópole	Registros móveis (episódicos)	Urbanismo	Especiais
		1:25.000					
VII	Dezenas de metros	1:10.000	Topoclima	Pequena cidade. Fáceis de bairro/ subúrbio de cidade	(Detalhes)	Arquitetura	
		1:5.000					
VIII	Metros	1:2.000	Microclima	Grande edificação. Habitação. Setor de Habitação	Baterias de instrumentos especiais	Habitação	

Fonte: MONTEIRO, 1976.

De acordo com Oke (1978), as alterações produzidas pelo urbano regem **duas camadas da atmosfera denominadas *urban canopy layer*** (camada do dossel urbano) **e *urban boundary layer*** (UBL - camada limite urbana), cujas distinções térmicas e de turbulências são marcantes (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura vertical da atmosfera urbana.



Fonte: ACTION BIOSCIENCE, 2016.

A UCL corresponde à atmosfera urbana inferior, limitada pela superfície ativa, isto é, ao nível dos telhados. Compreende todo o volume de ar contido na camada intra-urbana, fortemente condicionada por sua complexa forma tridimensional que contempla a temperatura das superfícies verticais (paredes) e horizontais (telhados, estradas, asfaltos, copas das árvores e solo exposto). Portanto, se identifica com os processos microclimáticos (OKE, 1976; 1981).

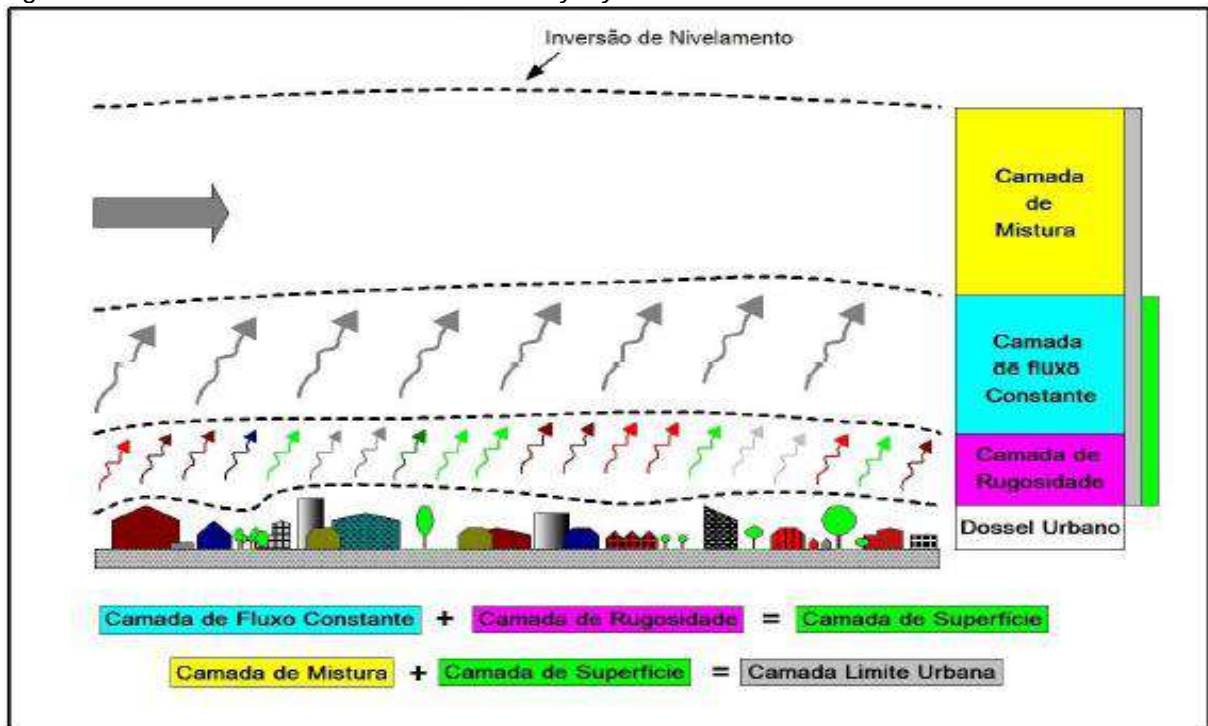
Já a UBL refere-se à atmosfera urbana superior, situada imediatamente acima do dossel urbano. Pode ser também conhecida como camada limite e integra toda a influência da cidade (fricção, aquecimento e resfriamento), apresentando dimensões variáveis no espaço e tempo em função da atividade humana e do ciclo diário de

aquecimento e resfriamento da atmosfera pela superfície, capaz de provocar a movimentação convectiva do ar (OKE, 1976; 1981).

Essa camada apresenta uma aerodinâmica particular. Em virtude do calor sensível liberado do dossel urbano (antropogênico ou não) e do arraste da superfície, a velocidade do vento reduz e a turbulência aumenta. Além do que, a convecção forçada à noite é capaz de gerar advecção sobre a cidade, podendo sua atuação estender-se a sotavento da área urbana, conhecida como “pluma urbana”.

A *urban boundary layer* possui três subdivisões: camada de rugosidade, camada de fluxo constante e camada de mistura (Figura 2). Na porção basal da UBL encontra-se a camada de rugosidade (setor cujo fluxo é influenciado pela rugosidade dos elementos) e a de fluxo constante. Em conjunto constituem a camada de superfície, onde o cisalhamento do vento com a superfície exerce a maior influência (ARNFIELD, 2006). Na camada de mistura são detectadas as alterações mais significativas: uma inversão de nivelamento, na parte superior, interrompe o transporte ascendente dos efeitos advindos da superfície (ARNFIELD, 2006). Segundo Gartland (2010), na referida camada a temperatura permanece praticamente constante em virtude da turbulência que mantém o ar misturado.

Figura 2 - Subdivisão vertical da *urban boundary layer*.



Fonte: Adaptado de ARNFIELD, 2006.

Embora não seja possível precisar sobre o ponto de densidade populacional ou de formas artificiais em que a notável alteração do clima local principia, derivando o clima urbano, sabe-se que a maior influência manifesta-se através da alteração da composição atmosférica (presença de materiais particulados, gases e substâncias químicas ativas), atingindo condições adversas na maioria dos casos, catalizadoras de modificações na ventilação, na umidade, no aumento de calor e das precipitações (Quadro 2) (LANDSBERG, 2006).

Quadro 2 - Variação média local dos elementos climáticos produzidos pela urbanização.

Elemento	Comparação com a zona rural	
Radiação	Global	15 a 20% menos
	Ultravioleta (inverno)	30% menos
	Ultravioleta (verão)	5%
Temperatura	Média anual	0,5 a 1,0°C mais
	Média mínima (inverno)	1,0 a 2,0°C mais
Velocidade do vento	Média anual	20 a 30% menos
	Ventos extremos	10 a 20% menos
	Calmaria	5 a 20% mais
Contaminantes	Núcleos de condensação e partículas	10 vezes mais
	Misturas gasosas	5 a 25 vezes mais
Precipitação	Total	5 a 10% mais
	Dias com menos de 5 mm	10% mais
	Neve	5% menos
Nebulosidade	Coberto	5 a 10% mais
	Neblina (inverno)	100% mais
	Neblina (verão)	30% mais
Umidade relativa	Inverno	2% menos
	Verão	8% menos

Fonte: BRYSON; ROSS, 1972 *apud* DANNI-OLIVEIRA, 1995.

Seus efeitos mais diretos são percebidos pela população através de manifestações ligadas à qualidade do ar, aos impactos pluviais e ao conforto térmico, articulados por Monteiro (1976), respectivamente, em três subsistemas: físico-químico, hidrometeorológico e termodinâmico, a partir dos quais é possível reconhecer e distinguir os fatores de controle, o núcleo do sistema, os níveis de resolução, os efeitos paralelos e a ação planejada que tratam respectivamente dos processos de insumo, transformação, produção, percepção e auto-regulação (MONTEIRO, 1976) (Quadro 3).

O subsistema físico-químico tem como produto a poluição do ar, cujas intempéries acarretam doenças respiratórias, oftalmológicas, etc. O canal hidrometeorológico abarca todas as formas meteorológicas hídricas (chuva, neve e nevoeiro), mecânicas (tornados) e elétricas (tempestades) capazes de desorganizar a vida urbana. Por fim, o termodinâmico, que se expressa através do calor, ventilação e umidade, se relaciona com as ilhas de calor (MONTEIRO, 1976). A ilha térmica é a principal manifestação do clima urbano e um dos principais problemas ambientais do século XXI (BRANDÃO, 1996; RIZWAN et al., 2007).

Quadro 3 - Articulação dos canais de percepção e os subsistemas do sistema clima urbano (SCU).

Caracterização	SUBSISTEMAS		
	Termodinâmico	Físico-Químico	Hidrometeorológico
	Conforto Térmico	Qualidade do Ar	Impacto Meteorológico
Fonte	atmosfera, radiação, circulação horizontal	atividade urbana, veículos automotores, indústrias, obras-limpas	atmosfera, estados especiais (desvios rítmicos)
Trânsito no Sistema	intercâmbio de operador e operando	de operando ao operador	do operador ao operando
Mecanismo de ação	transformação no sistema	difusão através do sistema	concentração no sistema
Projeção	interação núcleo e ambiente	do núcleo ao ambiente	do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	contínuo (permanente)	cumulativo (renovável)	episódio (eventual)
Observação	meteorológica especial (trabalho de campo)	sanitária e meteorológica especial	meteorológica hidrológica (trabalho de campo)
Correlações disciplinares tecnológicas	Bioclimatologia, Arquitetura, Urbanismo	Engenharia Sanitária	Engenharia Sanitária e infraestrutura urbana
Produtos	“ilha de calor”, ventilação, aumento de precipitação	poluição do ar	ataques à integridade urbana
Efeitos diretos	desconforto e redução do desempenho humano	problemas sanitários e doenças respiratórias, oftalmológicas, etc.	problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	controle do uso do solo, tecnologia de conforto habitacional	vigilância e controle dos agentes de poluição	aperfeiçoamento da infraestrutura urbana, regularização fluvial, uso do solo
Responsabilidade	natureza e homem	homem	natureza

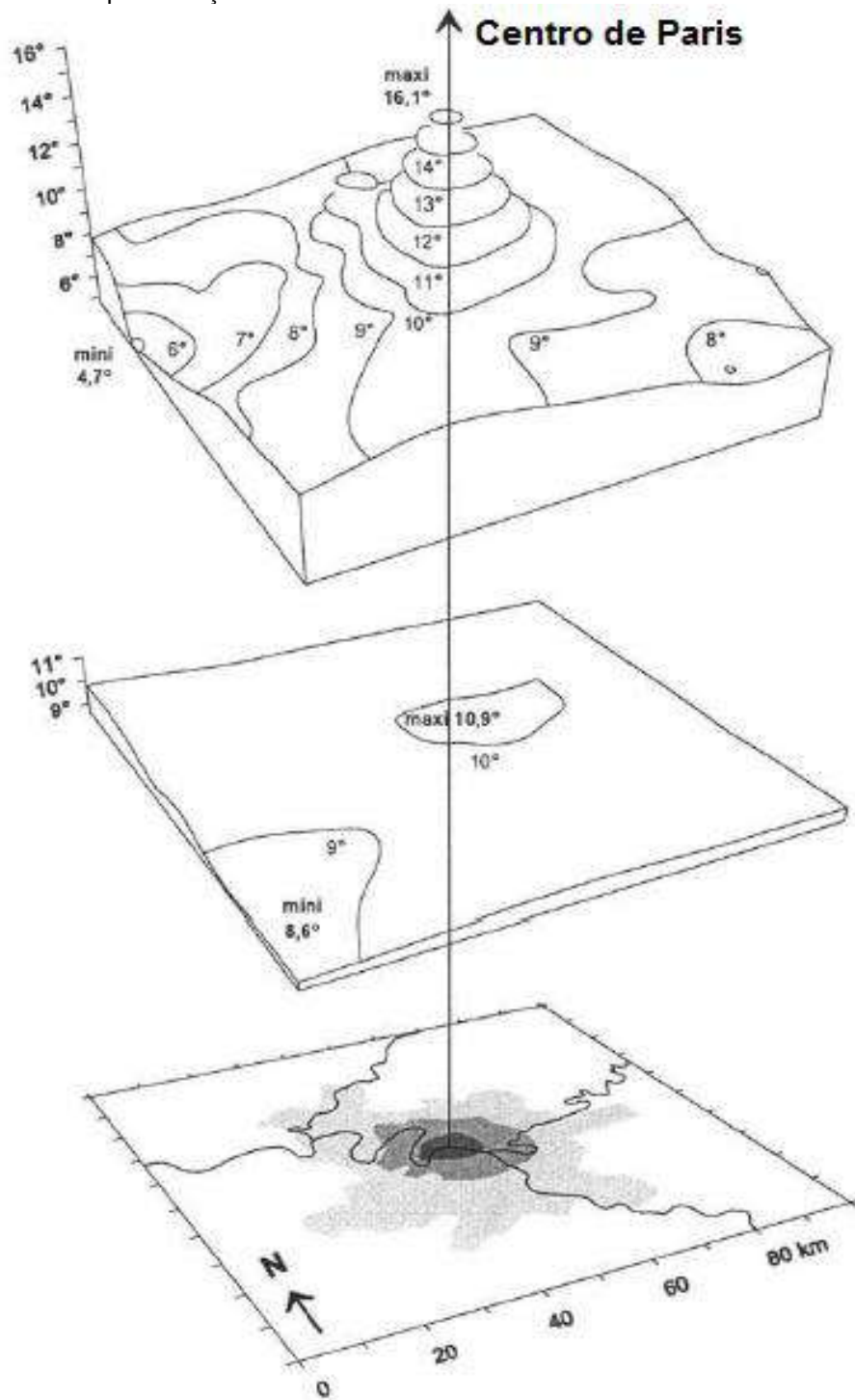
Fonte: MONTEIRO, 1976.

2.3 Ilha de calor: principal *output* do clima urbano

A ilha de calor urbana (ICU), um oásis inverso, refere-se ao aumento de temperatura do ar e da superfície dos espaços urbanos, quando comparado com

seus arredores (GARTLAND, 2010). O termo, cunhado por Manley (1958), advém da observação da espacialização do calor contido nas cidades, que traduzido pelas isotermas, destaca-se em feições de ilhas distintamente do “oceano frio” da paisagem rural (OKE, 1978) (Figura 3).

Figura 3 - Espacialização das isotermas.



Fonte: CANTAT, 2004.

Desde a primeira documentação do excesso de calor urbano, feita por Howard em 1818 (GOMES, 2017), **o fenômeno encontra-se intrinsecamente relacionado às alterações impostas pelas atividades humanas sobre a superfície e sua repercussão sobre troposfera basal**, mais especificamente até aproximadamente 2 km de altitude (FIALHO, 2009; GARTLAND, 2010). Não obstante,

a ilha de calor não representa a realidade do clima urbano, mas um de seus aspectos, traduzida por uma situação momentânea ou horária, motivada pela convergência pontual de fatores ligados às características de conformação do relevo, disposição dos equipamentos e dinâmica urbana, sob a influência de determinados tipos de tempo, associados aos sistemas atmosféricos em dado estágio de sua evolução temporal (JARDIM, 2007: 307).

Assim, a ICU esboça-se bastante complexa, surgindo da **diferença do balanço energético** (TAHA, 1997; PINHO; ORGAZ, 2000; AMORIM, 2019) **urbano e os arredores ou intraurbano, advindas da interação de um conjunto de variáveis**, os quais podem ser categorizados em controláveis e incontroláveis (RIZWAN et al., 2008). O Quadro 4 sumariza, as principais causas da manifestação da ilha de calor e os controladores atmosféricos de sua intensidade.

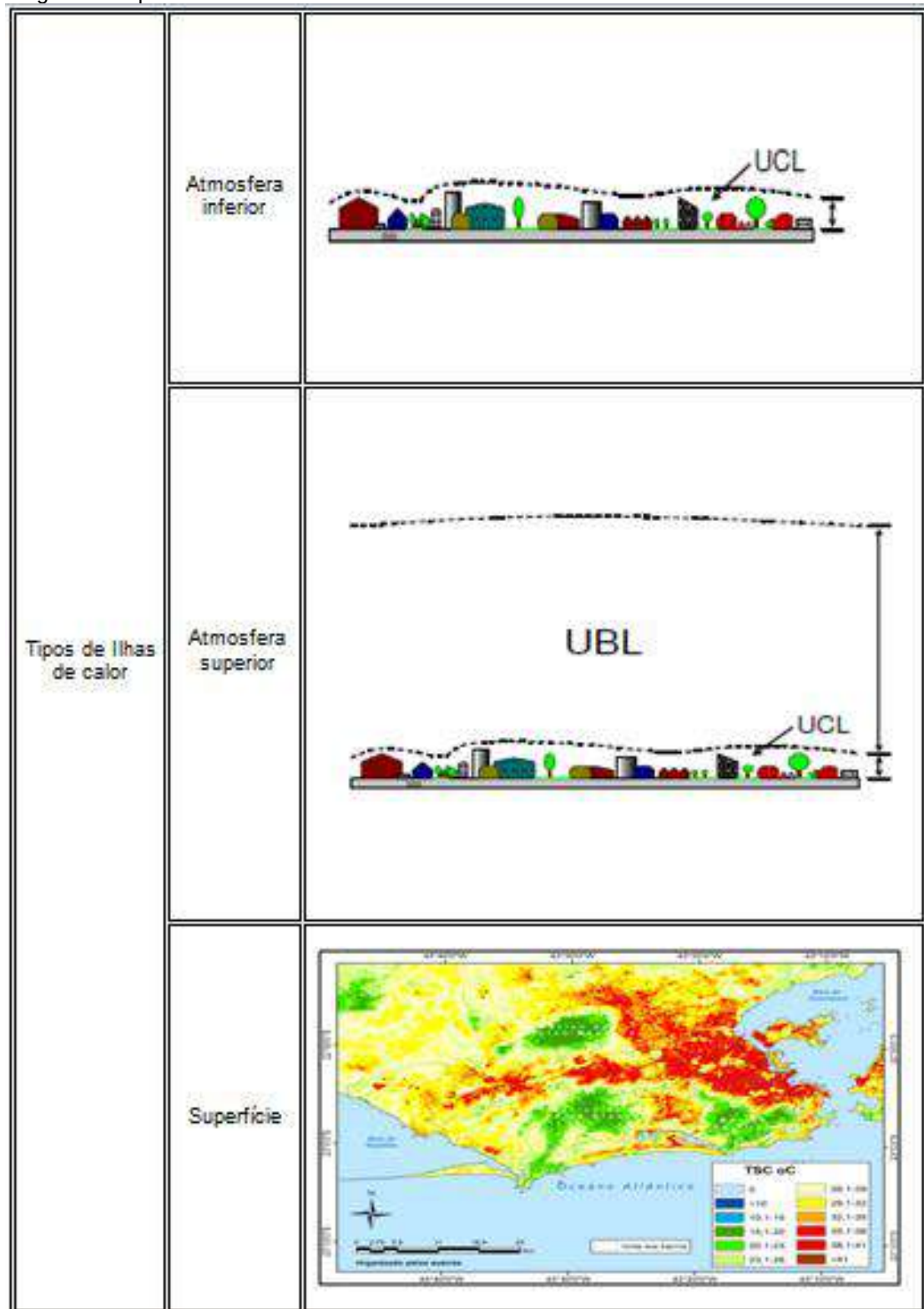
Devido aos avanços nos métodos de observação (FIALHO, 2009), **bem como da consideração da natureza ou propagação do calor, a literatura identifica dois tipos de ilhas de calor: de superfície e atmosférica** (OKE, 1978) (Figura 4). A ilha térmica superficial é uma medida indireta, sendo identificada por meio da tradução da radiação emitida dos alvos da superfície terrestre em valores de temperaturas. Exige, portanto, a correção das propriedades da superfície radioativa e atmosférica que influenciam a emissão e reflexão da radiação de comprimentos de ondas espectrais detectados pelo sensor (VOOGT; OKE, 2003).

Quadro 4 - Variáveis responsáveis pela configuração e regulação da ilha de calor.

Variáveis controláveis	Causas		Descrição	
	Variável permanente	Forma/condição da superfície	Característica termofísica	As propriedades térmicas dos materiais construtivos (baixo calor específico, elevada capacidade térmica, menor albedo e consequentemente menor inércia térmica) que, além de facilitarem a absorção, estoque de ondas curtas, emissão de ondas longas, facilitam sua condutância.
Variáveis controláveis	Variável permanente	Forma/condição da superfície	Característica termofísica	As extensas superfícies impermeáveis associadas ao sistema de drenagem escoam rapidamente os corpos líquidos. Dessa forma, pequena parcela da radiação absorvida é utilizada para evapotranspiração (fluxo de calor latente) e cria-se um estoque de calor sensível que aquece a superfície e consequentemente o ar acima dela.
				O arranjo dos prédios e a redução do <i>sky view factor</i> por <i>canyons</i> urbanos proporciona menor habilidade de liberação de ondas longas. A massa aglomerada de edifícios funciona como reservatório de energia ao condicionar reflexões múltiplas entre eles e converte-se em obstáculo para as correntes de ventos.
			Característica geométrica	A alta rugosidade das estruturas nas áreas urbanas reduz a quantidade de remoção de calor por convecção e transferência pelo vento.
Variáveis controláveis	Variável cíclica	Calor antropogênico	A população pode ter efeito duplo na geração de calor, um efeito direto, pois mais pessoas significa mais liberação de calor pelo metabolismo; efeito indireto advindo do uso de energia das construções (aquecedores e/ou refrigeradores), atividades econômicas e fluxos de veículos.	
		Efeito estufa urbano	O elevado número de poluentes, sobretudo aerossóis, sobre a cidade pode absorver e emitir radiação de ondas longas em direção à superfície e inibir o seu resfriamento, produzindo um "pseudo-efeito estufa".	
Variáveis incontroláveis	Controladores		Descrição	
	Variável permanente	Sítio urbano	A posição, orientação e declividade das vertentes são atributos do relevo que influenciam na conformação do fenômeno.	
	Variável temporária	Condição anticiclônicas	A IC está inversamente correlacionada com a velocidade do vento (remoção do calor vagorosamente), umidade e a cobertura de nuvens (mais energia solar é capturada).	
		Advecção (vento)	Transporte horizontal de calor: advecção quente pode reforçar a ICU; advecção fria pode suprimi-la.	

Fontes: OKE,1978; TAHA ,1997; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; RIZWAN et al. (2007); VOOGT, 2002. Organizado pela autora (2020).

Figura 4 - Tipos de ilha de calor urbana.



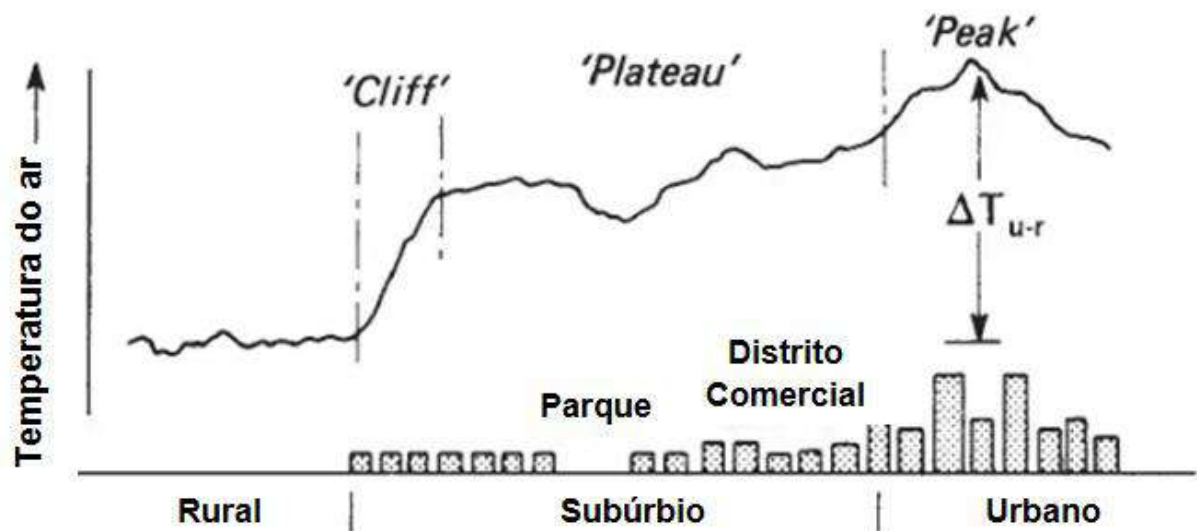
Fonte: ARFIELD, 2006; LUCENA, 2012. Organizado pela autora (2019).

A ilha de calor da atmosfera inferior (UCLI) e superior (UBLI) são identificadas por termômetros e/ou sensores que captam a temperatura do ar. A UCLI manifesta-se na coluna de ar abaixo do dossel urbano. Enquanto UBLI, em

diferentes níveis verticais, a partir do dossel urbano até 2.000 m de altura (GARTLAND, 2010).

Duas das características principais das ICU compreendem a forma e a intensidade, sendo passíveis de dimensioná-las no espaço e tempo (OKE, 1978; 1982; PINHO; ORGAZ, 2000). Em estudos pretéritos, voltados às grandes cidades norte-americanas, um típico perfil bidimensional traçado da área rural ao centro, passando pelo subúrbio, indicou uma variação crescente da temperatura rumo ao centro (OKE, 1978) (Figura 5). Um acentuado gradiente horizontal da temperatura se expressa na área fronteira do rural-urbano no chamado “*Cliff*” da ilha de calor; seguidamente adentra-se o “*Plateau*”, maior porção espacial com suave crescimento constante de aquecimento do ar, culminando no “*Peak*”, core da temperatura, na área central.

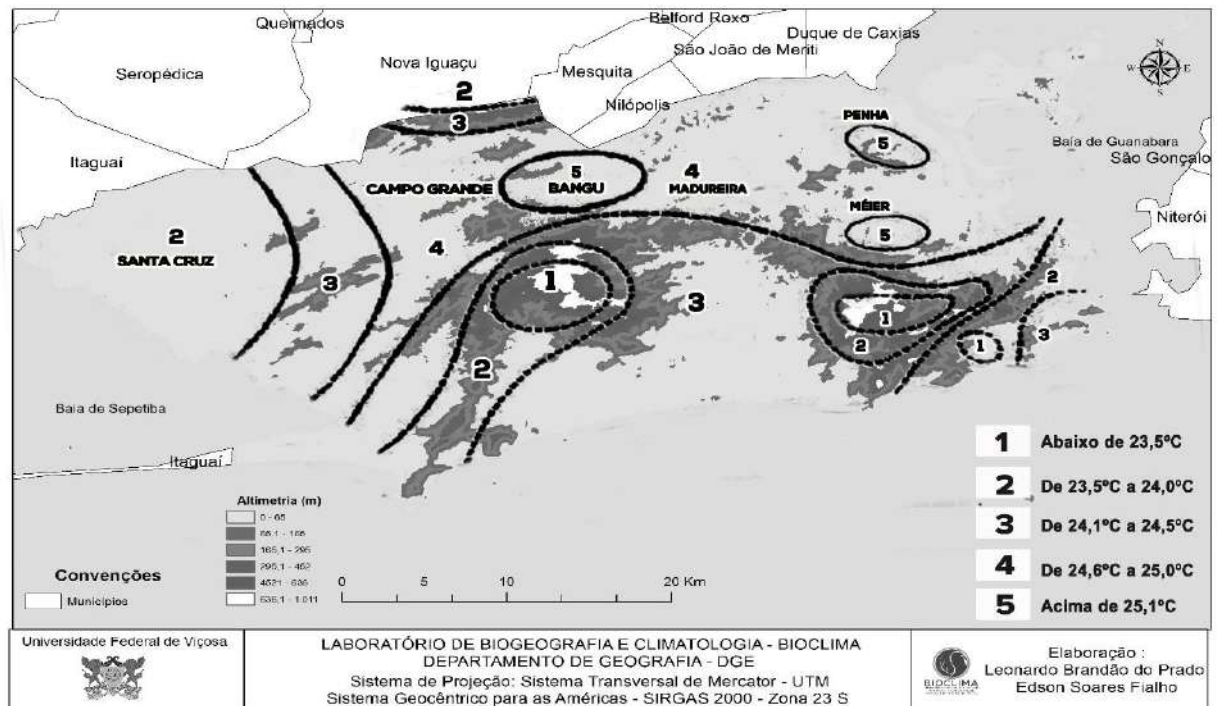
Figura 5 - Morfologia da ilha de calor clássica.



Fonte: Adaptado de OKE, 1978.

Como a morfologia da ilha é fortemente condicionada pelas formas do urbano (OKE, 1978), o que se observa é a desconfiguração da ilha de calor clássica. Em decorrência da intensificação e diversificação do uso do solo, os principais núcleos de calor deixaram de ser somente o centro desenvolvido. Um novo padrão, como o demonstrado na pesquisa de Brandão (1996) detectou a disseminação de núcleos igualmente quentes nos demais espaços do perímetro urbano, sobretudo, no subúrbio e periferia (Figura 6), uma resposta também ao padrão de urbanização tardia e acelerada aqui vigente.

Figura 6 - Morfologia da ilha de calor não clássica.



A intensidade é entendida como o gradiente simultâneo da máxima temperatura urbana e a mínima da temperatura rural (OKE, 1978) ou o observado dentro do espaço urbano (AMORIM, 2019). Desse modo, a ilha de calor urbana é uma medida de diferença.

Contudo, não é qualquer distinção entre pontos que se materializa o fenômeno. Uma identificação bem concluída perpassa as situações sinóticas mais frequentes (tipos de tempo padrão), distintos episódios sazonais (quatro estações do ano) e as variações interanuais (MONTEIRO, 1990a). Não sendo possível, um experimento inicial deve conter duas observações sazonalmente contrastantes (MONTEIRO, 1990b).

Buscando mensurar a intensidade da ICU, variáveis parametrizáveis foram simuladas em modelos empíricos, no século XX. Uma das primeiras fórmulas foi desenvolvida por Sundborg (1951) para Uppsala, Suécia (Equação 1 e 2), englobando os elementos climáticos vento e umidade:

$$\text{Dia: } \Delta t = 1,4^{\circ}\text{C} - 0,01n - 0,09V - 0,01T - 0,04e \quad (1)$$

$$\text{Noite: } \Delta t = 2,8^{\circ}\text{C} - 0,10n - 0,38V - 0,02T - 0,03e \quad (2)$$

onde:

Δt – diferencial térmico.

n – nebulosidade em décimos.

V – intensidade do vento em m/s.

T – temperatura em °C

e – umidade absoluta em g/m³

Tomando a equação 2 como referência, Landsberg ([1956]; 2006) propôs uma simplificação (Equação 3), adotando vento e nebulosidade por considerar mais importante que outros elementos à noite:

$$\text{Noite: } \Delta t = \frac{4,6 - 0,28n}{V} \quad (3)$$

onde:

Δt – diferencial térmico.

n – nebulosidade em décimos.

V – intensidade do vento em m/s.

Na década de 1970, Oke (1973) buscou a correlação entre o tamanho das cidades (expresso pelo tamanho da população) canadenses (Equação 4) e europeias (Equação 5) e a intensidade da ilha de calor urbana.

$$\Delta T_{u-r} = 2,96 \log P - 6,41 \quad (r^2 = 0,96) \quad (4)$$

$$\Delta T_{u-r} = 2,01 \log P - 4,06 \quad (r^2 = 0,74) \quad (5)$$

onde:

ΔT_{u-r} - intensidade da ilha de calor (°C).

P - população.

Embora vários estudos correlacionam positivamente o quantitativo populacional com a intensidade da ICU (OKE, 1973; OKE; MAXWELL, 1974; PARK, 1986; KARL et al., 1988; TOROK, et al., 2001; HUNG et al., 2005, PONGRACZ et

al., 2006), a densidade não significa obrigatoriamente um incremento de calor. Mesmo que indiretamente o crescimento de habitantes implique em ampliação do número de formas artificiais, circulação de veículos, atividades e liberação de energia das construções, existem outras variáveis, como o *sky view factor*, *designer* e tipo de material urbano, relacionadas ao planejamento e ordenamento do espaço, segundo os interesses do capital, que podem ou não favorecer um incremento térmico com o aumento populacional. Assim, a densidade populacional pode, mas não é necessariamente responsável pela intensificação de calor de uma área⁹. Ademais, como a ICU é uma resposta mútua de fatores controláveis e incontroláveis, não pode ser limitada a um único fator (RIZWAN et al., 2008).

Dessa maneira, uma medida de densidade urbana, por meio dos *canyons* urbanos, passou a ser explorada por Oke (1981) (Equação 6). Quando os ventos são incluídos junto com variável população, a relação é dada pela Equação 7 (OKE, 1976).

$$\Delta T_{u-r} = 7,45 + 3,97. (H/W) \quad (6)$$

onde:

ΔT_{u-r} = intensidade da ilha de calor (°C)

H = altura dos edifícios

W = distância entre os edifícios

$$\Delta T_{u-r} = AP^{1/4} \cdot U^{1/2} \quad (7)$$

onde:

ΔT_{u-r} = intensidade da ilha de calor (°C)

A = coeficiente empírico

P = população

U = velocidade do vento regional (m/s)

Outro modo, hodiernamente utilizado, é a definição do ponto “0” de referência (espaço de menor registro de temperatura do ar) e, a partir dele se

⁹ Corroborando com tal visão, Ugeda Junior e Amorim (2016) mencionam que espaços urbanos de médio e pequeno porte vêm apresentando modificações substanciais, notadamente no campo térmico e higrométrico, de magnitudes semelhantes às observadas nos grandes centros em virtude do modo de produção de seu espaço urbano.

processa a subtração com os demais pontos investigados, culminando no cálculo da intensidade da ICU (AMORIM, 2019).

Considerando a magnitude e intensidade, as seguintes categoriais são reconhecidas por permitirem comparabilidade: ilha de calor de fraca magnitude, quando as diferenças oscilam entre 0,1°C e 2,0°C; ilha de calor moderada, quando as diferenças se situam entre 2,1°C e 4,0°C; ilha de calor de forte magnitude, diferenças entre 4,1°C e 6,0°C; e ilha de calor de muito forte magnitude, quando as diferenças são superiores a 6,1°C (FENANDEZ GARCÍA, 1996; BRANDÃO, 1996). Não obstante, a magnitude e o horário de pico variam de cidade para cidade.

O padrão diário da ilha de calor atmosférica na maioria das cidades de latitude moderada indica picos de intensidade à noite, devido a redução do resfriamento (GARTLAND, 2010), geralmente cerca de 3 a 5 hora após o pôr do sol e declínio ao amanhecer (OKE, 1978). Corroboram com o caráter noturno do fenômeno as pesquisas para Madri, Espanha (GOMEZ et al., 1993), Melbourne, na Austrália (MORRIS; SIMMINDS, 2000), Nova Iorque, Estados Unidos (GEDZELMAN et al., 2003), Paris, França (CANTAT, 2004), Lisboa, em Portugal (ALCOFORADO; ANDRADE, 2006).

Em cidades tropicais, intensidades máximas estiveram associadas ao período diurno, como em Temuco, Chile (STEFFES et al., 2001), Rio de Janeiro, Brasil (BRANDÃO, 1996) e Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro (LUCENA, 2005).

Qualquer área urbana pode estar sujeita a ocorrência das ilhas de calor seja grande, média ou pequena, seja em zonas tropicais ou temperadas. Dependendo da localização geográfica e das condições climáticas prevalentes, as ICU podem ser benéficas ou prejudiciais para o morador urbano (TAHA, 1997). De modo geral, em cidades com clima relativamente frio ou estação fria, podem trazer benefícios como custos mais baratos de aquecimento da casa, maior conforto ao ar livre, menos riscos climáticos nas estradas: como gelo ou neblina na superfície, e propiciar condições para o crescimento das plantas e habitat animal (STWART; OKE, 2012).

Por outro lado, em climas ou estações do ano relativamente quentes podem elevar a demanda por energia (TAHA, 1997; STWART; OKE, 2012), os níveis de ozônio (ROSENFELD et al., 1998), despendem maiores esforços para a construção e manutenção de infraestrutura (GARTLAND, 2010), reduzir o desempenho humano (MONTEIRO, 2001) afetando as condições de trabalho e atividades de lazer, gerar

desconforto térmico e, potencialmente, ameaça de estresse e mortalidade (GARTLAND, 2010; STWART; OKE, 2012). Além disso, propicia movimentos advectivos do ar, que ao convergirem para os espaços quentes, carregam consigo poluentes atmosféricos, aumentando assim, o risco de doenças respiratórias relacionados à qualidade do ar (AMORIM, 2019).

Ilhas de calor também possuem implicações climatológicas. Considerando que as maiorias das estações meteorológicas estão localizada em áreas urbanas, seus efeitos podem conduzir a uma contaminação dos registros de séries temporais (STEWART; OKE, 2012).

Assim sendo, medidas de mitigação dos efeitos da ICU trazem benefícios para a qualidade de vida das comunidades, como a redução de temperaturas, economia de energia, melhoria da qualidade do ar, conforto humano e saúde (GARTLAND, 2010). Dentre as medidas possíveis podem-se categorizar as relacionadas à redução da liberação de calor antropogênico, ao melhor *designer* do telhado (por exemplo, telhados verdes, resfriamento por *spray*, telhados refletivos etc.) e pavimentos frescos, tais como aumento do albedo, umidificação e vegetação (RIZWAN et al., 2008).

2.4 Métodos de observação das ilhas de calor

As medidas de diferença detectadas das ilhas de calor contemplam métodos empregados desde as abordagens mais tradicionais até as mais recentes. Inicialmente, um par de estações meteorológicas padrão “identificava” as distinções entre os dosséis do espaço urbano e o rural.

O químico Luke Howard, em 1818, em seu livro *The climate of London*, foi um dos pioneiros a tornar público a contaminação atmosférica e a elevação da temperatura noturna da cidade em 2,2°C em relação ao campo, como reflexo da produção de combustão. Em meados do século XIX, foi a vez do meteorologista Emilien Renou constatar que Paris estava em média 1°C mais quente que os arredores (BRANDÃO, 1996).

Em resposta aos avanços técnicos, as pesquisas tornaram-se mais comuns pautando-se em identificar a intensidade das diferenças dos parâmetros climáticos

entre o meio urbano e rural, em função da relativa facilidade de aquisição dos dados. Pois, as cidades dispõem de estações meteorológicas oficiais localizadas na área urbana, além daquelas instaladas em aeroportos ou universidades, tomadas como representativas do meio rural (FIALHO 2009; GARTLAND, 2010). Citamos os trabalhos de Landsberg ([1956] 2006), Chandler (1961; 1962; 1965), Tumanov et al. (1999), Brazel et al. (2000) e Morris e Simmonds (2000).

Embora essa técnica traga a necessidade da escolha de pontos representativos de cada espaço, possuindo também o mesmo sítio e altitude, indaga-se sobre o quão os locais comumente selecionados (centro e aeroporto) podem retratar a realidade dos dados da ilha de calor. A questão é que as estações meteorológicas são localizadas em torres ou coberturas, fugindo da altura ideal de 1,5m para medição do dossel urbano, não refletindo, portanto, suas condições. Outro ponto, é que no caso dos aeroportos, estes não estão protegidos do vento e a vegetação é retirada para a construção de pistas de pouso e decolagem (GARTLAND, 2010). Além disso, as estações têm a finalidade de observar as condições meteorológicas do ar livre, na escala regional.

As estações padrões também são usadas em análises de séries históricas, onde se busca avaliar as tendências da intensidade da ilha de calor ao longo do tempo. Pode-se comparar um conjunto de estações rurais *versus* urbanas ou estudar a tendência em uma única estação que melhor representa o comprometimento com o organismo funcional da cidade. Essa abordagem é acompanhada de métodos estatísticos dentre os quais os mais comuns são regressão linear (simples ou múltipla) e o teste de Mann-Kendall (LUCENA, 2012; 2013). Contemplam as série temporais as pesquisas desenvolvidas em Nova York, Estados Unidos (ACKERMAN, 1985), Rio de Janeiro, Brasil (BRANDÃO, 1987, 1992), Cidade do México, México (JUREGUI, 1993), Tokyo, Japão (MOCHIDA et al., 1997), Fairbanks, Alasca (MAGEE et al., 1999), Bologna, Itália (VENTURA et al., 2002), Addis Adeba, Etiópia (CONWAY et al, 2004), Istambul, Turquia (EZBER et al., 2007) e Seoul, Coréia do Sul (LEE; BLAIK, 2010).

A respeito desta sondagem, é importante ficar atento às mudanças na instrumentalização, na localização ou da estrutura próxima à estação padrão, bem como adotar as estações que apresentam pouco ou nenhum período ininterrupto de dados. Ressalta-se que o acesso à série depende dos registros históricos documentados e disponibilizados pelos órgãos oficiais (LUCENA, 2012; 2013).

Com a emergência da micrometeorologia na década de 1920, nos países de forte tradição naturalista como a Alemanha, Áustria e Suíça, a comparação entre dados de estações padrão (urbana e rural) para detectar as anomalias meteorológicas, sobretudo, diferenças de temperatura, foi questionada (ASSIS, 2005). Essa técnica, embora evidencie o ritmo de ganho e perda de energia entre os dois pontos amostrais, generaliza a realidade espacial dos dados, podendo sub ou superestimá-los.

Por essa razão, Schmidt, em 1927, introduziu a técnica do transecto móvel, mapeando o contraste térmico em Viena, Áustria. Um transecto móvel implica percorrer um trajeto predeterminado, parando em locais representativos das partes que compõem o todo complexo do espaço urbano e efetuando mensurações de temperatura e demais elementos climáticos, em função do primeiro, para análise do campo térmico (GARTLAND, 2010).

O método do transecto pode variar: andando (SEKIGUTI, 1947), bicicleta (PEREIRA; BRANDÃO, 2008), automóveis (BELO FUENTES, 1994; YAMASHITA, 1996; STEWART, 2000; OSCAR JÚNIOR; BRANDÃO, 2015; LEMOS, 2018) ou ferrovias (YAMASHITA, 1990 *apud* YAMASHITA, 1996).

É recomendado que os transectos sejam executados em no máximo uma hora em virtude das variações das condições atmosféricas. As temperaturas necessitam ser ajustadas de acordo com um patamar de tempo, sendo, portanto, comparadas com dados de uma ou mais estações meteorológicas padrão (MONTEIRO, 1990b; GARTLAND, 2010). Acrescenta-se que é importante permitir que os equipamentos tenham tempo para entrar em equilíbrio com o ambiente antes de aferir medição (GARTLAND, 2010).

A ampliação de pontos amostrais pode ocorrer também por meio de transectos fixos como nos trabalhos de Danni-Oliveira (1980) em Porto Alegre; Monteiro e Sezerino (1990) em Florianópolis; Mendonça (1995) em Londrina; Brandão (1996) em Rio de Janeiro; Amorim (2005) em Birigui; Farias e Brandão (2006) no bairro Maracanã.

Em se tratando da ilha de calor vertical da atmosfera urbana inferior e superior, a prospecção das diversas altitudes acima da superfície incorpora comumente os balões meteorológicos instrumentalizados. Mais recentemente, aeronaves remotamente pilotadas (RPA's) vêm sendo utilizadas (BRÚSSULO, 2015; NEVES et al., 2015; BRÚSSULO et al., 2017) devido a sua estabilidade em meio a

turbulência, sendo capaz de manter altura e posicionamento praticamente inerte, efetuando, portanto, medições mais uniformes que os balões.

Enquanto os métodos anteriores são utilizados para verificar a ilha de calor atmosférica, o sensoriamento remoto é usado para monitorar outra categoria do fenômeno, a ilha de calor da superfície. Sensores térmicos em aeronaves ou satélites captam a energia invisível refletida (parcial) e emitida em comprimentos de onda longos (3 – 14 μm) pela superfície, as quais a intensidade é proporcional à temperatura, possibilitando gerar imagens termais (AMORIM, 2019).

Não deve ser confundida com a temperatura de brilho (TB), estimativa da energia cinética da superfície que não traz correções dos contaminantes atmosféricos, mascarando a real termografia da superfície (LUCENA, 2012; 2013). Por outro lado, não se pode afirmar que a imagem termal equivale à temperatura do ar intraurbano, embora estabeleça relações, uma vez que se limita a estrutura horizontal da superfície dos objetos (FIALHO, 2012; 2013).

Tal característica impossibilita não só a compreensão do comportamento vertical do ar, como também a captação das variações de detalhes existentes, produzindo uma vista panorâmica da temperatura. Pois, devido à limitação da resolução espacial do próprio sensor, o resultado da termografia de superfície é a soma dos componentes individuais ponderados por suas respectivas superfícies, em cada pixel. Refletindo, portanto, a temperatura do elemento mais representativo (FIALHO, 2012).

Uma estratégia é empregar os transectos fixos e móveis para validação dos dados remotos. Também, complementarmente, outros índices obtidos vêm sendo analisados em conjunto, visando uma interpretação integrada da ilha de calor, a saber: índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de área construída (IBI), área impermeável da superfície (ISA), área construída por diferença normalizada (NDBI), índice de condição de temperatura (TCI), índice de condição de vegetação (VCI), entre outros (LUCENA, 2013).

Dentre os autores que se apropriaram do sensoriamento remoto podemos citar Rao (1972), Lombardo (1985); Mendonça (1995); Aniello et. al., (1995), Voogt e Oke (2003), Hung et al., (2005); Chen, et al, (2006); Laeta e Brandão (2010); Brito (2011); Lucena (2012); Dorigon e Amorim (2014). A vantagem da técnica consiste em explorar a espacialização da temperatura em grandes áreas. Ponto esse restrito nos métodos anteriores por permitirem a detecção apenas em nível pontual.

Por fim, outra maneira de inferir a ilha de calor superficial refere-se à modelagem, a partir do Mapa Climático Urbano (UCMap). O conceito de UCMap foi desenvolvido há 50 anos pelo pesquisador alemão Knoch, que buscou integrar pela primeira vez um sistema de mapeamento climático urbano para fins de planejamento (REN et al., 2010; REN et al., 2013).

De 1970 até o presente, o interesse pelo estudo se intensificou e mais de 15 países espalhados pela Europa, Ásia e América do Sul processaram seus próprios UCMaps. Abrangem a abordagem as pesquisas de Beckröge (1988) na Alemanha; Katzschner (1988) na Alemanha; Swaid (1992) em Israel; Lazar et al. (1994) na Austria; Yoshida (1998) no Japão; Richards (2002) em Nova Zelândia; Wang (2004) na China; Charalampopoulos e Chronopoulou-Sereli (2005) na Grécia; Nery et al. (2006) no Brasil; Ng et al. (2008; 2009) em Hong Kong; Ren et al. (2013) em Taiwan; Ferreira et al. (2017), Lemos et al. (2021) e Freitas et al. (2021) no Brasil.

O Mapa Climático Urbano é uma ferramenta de informação e avaliação que espacializa num mapa bidimensional o potencial de aquecimento e resfriamento para balizar considerações de planejamento, visando mitigar fenômenos climáticos urbanos e promover espaços sustentáveis, saudáveis e confortáveis. Dessa forma, o UCMap busca eximir a lacuna tradicionalmente existente entre o clima urbano e o planejamento, auxiliando os formuladores de políticas públicas (REN et al., 2010; REN et al., 2013).

Sua estrutura se concentra na consideração e mapeamento de uma série de camadas de entradas: elementos climáticos e meteorológicos, informação geográfica do terreno, de espaços verdes e parâmetros de planejamento (REN et al., 2013; REN et al., 2010; FREITAS et al., 2021). Ou seja, uma combinação holística e estratégica de diversos fatores climáticos e/ou formas urbanas (FREITAS et al., 2021) que influenciam no balanço energético e consequentemente na formação da ICU.

O UCMap apresenta dois componentes principais, a saber, o Mapa de Análise Climática (UC-AnMap) e o Mapa de Recomendações para o Planejamento Climático Urbano (UC-ReMap). O UC-AnMap espacializa as condições climáticas e áreas sensíveis ao aquecimento por *Climatopes* (unidade básica que apresentam características climáticas relativamente homogêneas), já o UC-ReMap inclui instruções para o planejamento do ponto de vista climático urbano (NG et al., 2009; REN et al., 2010).

Dentre as vantagens da aplicação do UCMap se reforça que é um estudo de prática interdisciplinar, cujos resultados podem ser implementados nos processos reais de planejamento físico, como plano diretor de municípios, plano de zoneamento e plano de uso da terra; e os fenômenos e dados espacializados, bem como as recomendações são de fácil apreensão pelos planejadores urbanos e formuladores de políticas. Contudo, os métodos devem ser constantemente aprimorados com o esforço dos climatologistas urbanos almejando resultados cada vez mais refinados (REN et al., 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

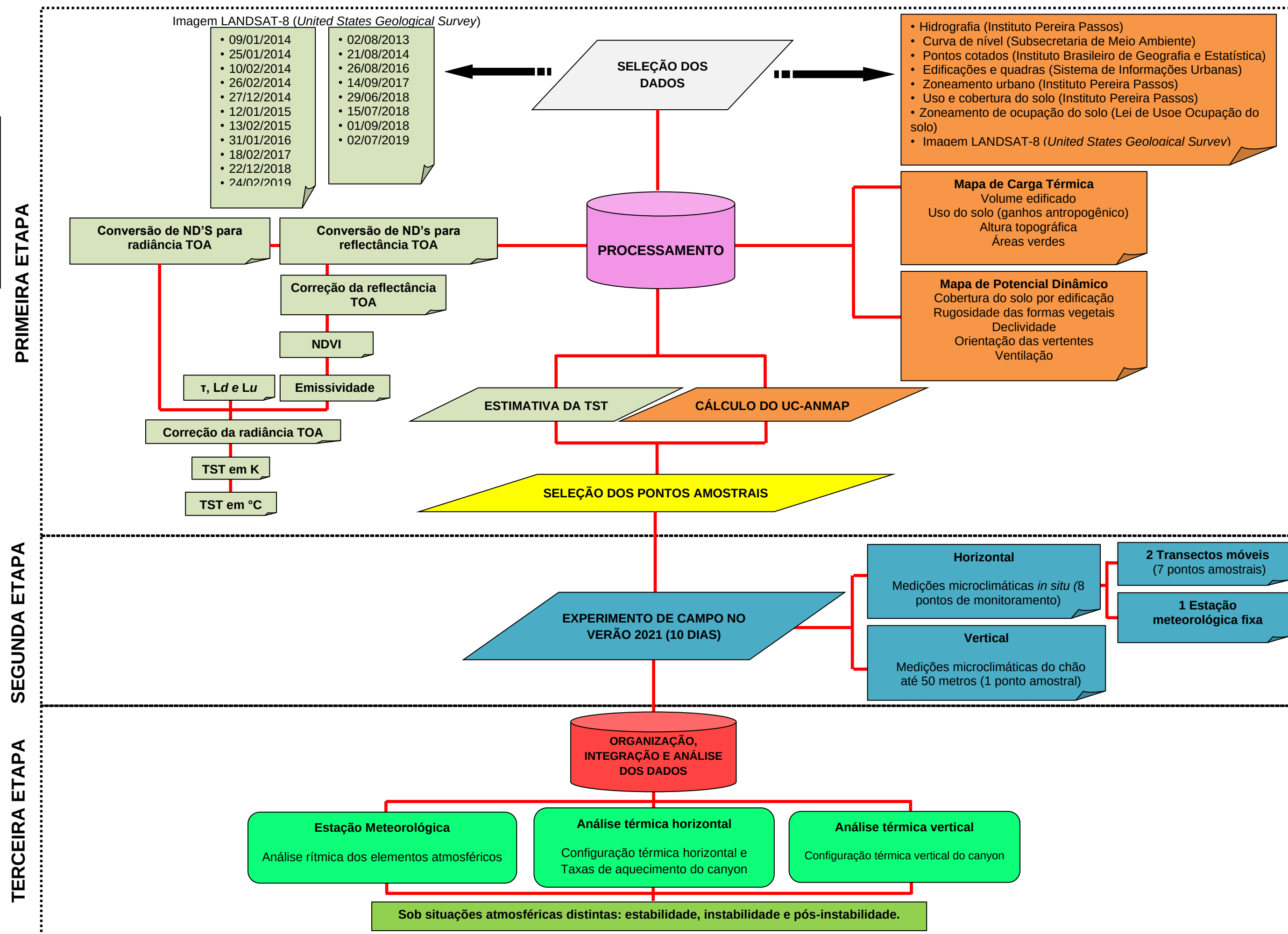
Nesta seção, descreve-se a estratégia metodológica aplicada para a análise da influência da morfologia urbana no desempenho térmico, horizontal e vertical (*urban canopy layer*), do clima urbano do *Central Business District* do Rio de Janeiro (RJ). Os procedimentos metodológicos envolvidos neste capítulo, os quais incluem as fases pré-campo, experimento de campo e pós-campo, encontram-se esquematizados no fluxograma da Figura 7.

A presente pesquisa iniciou-se com a fase pré-campo, que consistiu na aquisição e processamento dos dados para a elaboração da termografia média da temperatura de superfície terrestre (TST) e do mapa de suscetibilidade climática urbana (potencial de aquecimento e resfriamento), o UC-AnMap. Todos os dados foram processados na plataforma ESRI *Arcgis* 10.5.

A TST infere a ilha de calor de superfície, enquanto o UC-AnMap espacializa as áreas suscetíveis à configuração da ilha de calor. Logo, o processo de confrontação entre os dois mapas é estratégico e serviu de contributo para a escolha dos pontos amostrais distribuídos no CBD para o levantamento dos dados meteorológicos e análise da configuração horizontal e vertical do *canyon* urbano da avenida Rio Branco.

A TST foi estimada a partir da calibração radiométrica e atmosférica de 19 imagens orbitais TIRS do *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT) - 8, sendo 11 de verão (2014 a 2019) e 8 de inverno (2013 a 2019), adquiridas no site do *United States Geological Survey* (USGS). Já o UC-AnMap foi elaborado partindo da consideração dos efeitos positivos e negativos da morfologia urbana sobre o potencial dinâmico e carga térmica do clima urbano. Considerou-se a cobertura do solo por edificação, a rugosidade das formas vegetais, declividade, orientação das vertentes e rugosidade como as formas que interferem no potencial dinâmico. Enquanto, o volume edificado, ganhos antropogênicos, altura topográfica e efeito bioclimático por interferirem na carga térmica. A base de dados utilizada para a elaboração dessas informações foi adquirida junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Pereira Passos (IPP), Sistema de Informação Urbana (SIURB), Subsecretaria de Meio Ambiente, USGS (imagem LANDSAT-8) e Lei de Uso e Ocupação do Solo (zoneamento de ocupação urbana).

Figura 7 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos.



Da confrontação da TST e do UC-AnMp, identificaram-se um total 36 pontos amostrais estratégicos para a aferição horizontal e vertical da *urban canopy layer* (do chão até 50 metros). Inicialmente, a proposta desta pesquisa contemplava a investigação desses 36 pontos de coleta, abarcando todo o CDB do Rio de Janeiro. O monitoramento horizontal era composto por 32 pontos distribuídos em 5 transectos móveis e 2 estações meteorológicas. Já a coleta vertical seria realizada em 2 pontos com o auxílio da Aeronave Remotamente Pilotada (APÊNDICES A, B, C, D, E, F, G, e H).

Infelizmente, não foi possível colocá-la em prática devido ao aumento do número de casos de COVID-19 no município do Rio de Janeiro, pois exigiria a exposição de um número maior de voluntários. Sendo assim, decidiu-se pela manutenção de 1 estação de controle (1,5 m) alocada no Aeroporto Santos Dumont, 1 ponto para o voo da RPA, no Largo da Caroca, e 7 pontos distribuídos (1,5 m) em 2 transectos móveis (sentidos sul-norte e norte-sul), via bicicleta, ao longo da Avenida Rio Branco. Decidiu-se por esses transectos, na referida avenida, pelo fato de haver uma divergência em relação aos valores da TST e as áreas suscetíveis ao aquecimento do UC-AnMap, o que chamou a atenção para aprofundar a investigação dos efeitos da morfologia do *canyon* urbano sobre o campo térmico.

Reestruturado a logística do trabalho de campo, na etapa do experimento, as coletas climáticas aconteceram durante o verão, nos dias 24/01/2021 (domingo), 25/01/2021 (segunda-feira), 31/01/2021 (domingo), 07/02/2021 (domingo), 14/02/2021 (domingo), 21/02/2021 (domingo), 22/02/2021 (segunda-feira), 07/03/2021 (domingo), 14/03/2021 (domingo) e 15/03/2021 (segunda-feira). Os transectos (simultâneos) registraram a temperatura do ar, vento (velocidade e direção) e cobertura do céu. No voo, a RPA coletou, no chão, em 10 metros, 20 metros, 30 metros, 40 metros e 50 metros, a temperatura do ar e umidade relativa. Essas posições altimétricas foram definidas com base na autonomia da bateria da RPA e por ser subunidade de valor de referência da taxa adiabática, amplamente difundidas na literatura. Tanto as medidas microclimáticas horizontais quanto as verticais foram realizadas às 06, 13 e 20 horas.

A estação meteorológica registrou os dados de 15 em 15 minutos de temperatura ar, umidade relativa, pressão atmosférica, chuva e vento (direção e velocidade), iniciando sempre às 05:30 e finalizando às 20:30. A estação exprime a resposta local ao comportamento da circulação atmosférica regional. Portanto, seus

dados serviram para a compreensão das condições atmosféricas antes (05:30), durante (6:00 às 20:00) e pós-campo (20:30), bem como de comparação para identificar a mobilidade têmporo-espaial das ilhas de frescor ou calor (intensidade).

Por fim, na fase pós-campo, as observações horizontais registradas *in situ* (1,5 m), em diferentes níveis verticais da *urban canopy layer* e da estação meteorológica (1,5 m) foram tabuladas, organizadas e integradas. Para estes procedimentos, utilizou-se a planilha do *Mirosoft Office Excel* 2007. Esse aplicativo possibilitou a elaboração de gráficos de análise rítmica horária dos elementos atmosféricos da estação meteorológica de cada dia do experimento de campo. Bem como, de gráficos para compreensão da variabilidade térmica vertical da atmosfera urbana inferior do *canyon* urbano. Já a planilha organizada com os dados dos transectos móveis foi levada para *Arcgis* 10.5, onde foi possível mapear mobilidade têmporo-espaial do campo térmico do *canyon* da avenida Rio Branco. Com a planilha também foram produzidos gráficos que indicaram as taxas de aquecimento, obtidos a partir da subtração dos maiores e menores valores diários de temperatura do ar para cada ponto amostral.

As observações microclimáticas horizontais e verticais constituíram a base para a análise e compreensão da influência da morfologia urbana sobre a variabilidade térmica da atmosfera do *Central Business District* do Rio de Janeiro (RJ). Essa análise também foi condicionada a partir de uma abordagem qualitativa da atmosfera, isto é, considerando os diferentes processos atmosféricos, a saber: situação sinótica de estabilidade, situação sinótica de instabilidade e situação sinótica de pós-passagem de sistemas produtores de instabilidade (repercussão de ZCAS).

3.1 Primeira etapa: pré-campo

3.1.1 A missão LANDSAT-8 e a seleção dos dados TIRS

A missão LANDSAT entrou em órbita pela primeira vez na década 1970¹⁰. Fruto de um projeto desenvolvido pela *National Aeronautics e Space Administration*

¹⁰ Esse programa foi inicialmente denominado ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) e em 1975 passou a ser designado LANDSAT.

(NASA), Agência Espacial Americana, almejava exclusivamente atuar em pesquisas de mapeamento de recursos naturais terrestres em escala global e repetitiva.

Até o presente, a sequência da série envolveu oito satélites lançados, representando o principal banco de dados multiespectrais orbitais. São eles: LANDSAT-1 (1972), LANDSAT-2 (1975), LANDSAT-3 (1978), LANDSAT-4 (1982), LANDSAT-5 (1984), LANDSAT-6 (1993), LANDSAT-7 (1999) e LANDSAT-8 (2013). Os três primeiros operaram com os sensores RBV e MSS; a plataforma 4 e 5, com os MSS e TM; todos, atualmente, desativados. Apenas continuam ativos o LANDSAT-7 (sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* - ETM+) e 8 (sensores *Operational Terra Imager* - OLI e *Thermal Infrared Sensor* - TIRS). Embora, o LANDSAT-7 tenha apresentado avarias de *hardware*, operando com o espelho corretor de linha (*Scan Line Correction* - SLC) desligado. Desde então, a plataforma produz imagens com vazios e/ou ruídos (USGS, 2013).

Com o desenvolvimento tecnológico, os sensores a bordo dos satélites têm se aprimorado, principalmente, em relação às bandas espectrais oferecidas, a resolução espacial e sensibilidade radiométrica. Neste caso, destacam-se os sensores OLI e TIRS, os mais recentes da série (Tabela1) (USGS, 2013).

Tabela 1 - Características do satélite LANDSAT-8.

Satélite LANDSAT-8	
Sensores	Operational Land Imager (OLI): bandas 1 a 9 Thermal Infrared Sensor (TIRS): Bandas 10 e 11
Bandas espectrais e Resolução espacial	Banda 1: Costal aerosol (0,43 - 0,45 μm) - 30 m Banda 2: Azul (0,450 - 0,51 μm) - 30 m Banda 3: Visível verde (0,53 - 0,59 μm) - 30 m Banda 4: Visível vermelho (0,64 - 0,67 μm) - 30 m Banda 5: Infravermelho próximo (NIR) (0,85 - 0,88 μm) - 30 m Banda 6: Infravermelho médio (SWIR) 1 (1,57 - 1,65 μm) - 30 m Banda 7: Infravermelho médio (SWIR) 2 (2,11 - 2,29 μm) - 30 m Banda 8: Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm) - 15 m Banda 9: Cirrus (1,36 - 1,38 μm) - 30 m Banda 10: Infravermelho termal (TIRS)1 (10,6 –11,19 μm) - 100 m Banda 11: Infravermelho termal (TIRS)2 (11,5 –12,51 μm) - 100 m
Tamanho da cena	170x185 km
Resolução radiométrica	16 bits
Projeção e Datum	UTM - WGS-1984
Revista	16 dias

Fonte: *United States Geological Survey* , 2013.

Essa evolução confere suporte à ampliação do uso dos produtos LANDSAT nas mais diversas pesquisas temáticas, incluindo nos estudos aplicados à climatologia urbana. Destacadamente, **as imagens orbitais são de clara importância na análise da evolução têmporo-espacial** da termografia de superfície, cujo foco é o estudo da **ilha térmica superficial**.

A primeira etapa desta pesquisa encontra-se ancorada na seleção e processamento dos dados do sensor TIRS. O TIRS¹¹ captura dados em duas bandas espectrais (banda 10 e 11), cobrindo o comprimento de onda na região do infravermelho termal (10.6 - 11.19 μm e 11.5 - 12.51 μm), antes coberto por uma única banda do sensor *Landsat Thematic Mapper* (TM) e ETM+, possibilitando o mapeamento da temperatura dos alvos presentes na imagem (USGS, 2013).

Ademais, as bandas termais com resolução de 100 metros são registradas e entregues aos usuários com 30 metros. Outro avanço significativo diz respeito ao melhor desempenho radiométrico do sensor (16 bits), comparado aos do LANDSAT-5 e 7 (8 bits). A resolução de 16 bits confere maior acurácia na caracterização de alvos e condições do estado da cobertura da terra (USGS, 2013). Essas características são contributos relevantes para a **identificação e análise espacial da ilha de calor de superfície no Central Business District do Rio de Janeiro**.

Assim, dezenove imagens LANDSAT-8, banda 10 (10,6 – 11,19 μm), situadas na órbita-ponto 217-076, abrangendo o município do Rio de Janeiro, foram adquiridas gratuitamente no site do *United States Geological Survey* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). As imagens correspondem ao conjunto de dados que se encontrava disponível, dentro dos critérios estabelecidos para a seleção: representativa da última década (2011 a 2020), presença de cobertura de nuvens menor que 10%, atentando-se, sobretudo, para o espaço do *Central Business District*, e níveis de qualidade 9.

Todos os rasters correspondem ao período matutino (variaram entre 09:50 a 09:53, horário de Brasília) e encontram-se sistematizados em períodos sazonais distintos, sendo 11 de verão e 8 de inverno¹², quando os sistemas e elementos

¹¹ Com relação ao sensor TIRS, a USGS lançou nota informativa não recomendando o uso da banda 11 para estimativas de temperatura da superfície em virtude de anomalias existentes na mesma devido a dispersão da luz difusa que chega o sensor.

¹² A diferença quantitativa entre as imagens utilizadas no verão e inverno é exclusivamente fruto dos critérios adotados para a seleção das imagens.

atmosféricos comportam-se diferentemente. Abaixo, segue a relação dos dados TIRS selecionados (Tabela 2).

Tabela 2- Relação das imagens LANDSAT-8/sensor TIRS/banda 10.

Data da passagem	
Verão	Inverno
09/01/2014	02/08/2013
25/01/2014	21/08/2014
10/02/2014	26/08/2016
26/02/2014	14/09/2017
27/12/2014	29/06/2018
12/01/2015	15/07/2018
13/02/2015	01/09/2018
31/01/2016	02/07/2019
18/02/2017	
22/12/2018	
24/02/2019	

Fonte: *United States Geological Survey*, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2019.

3.1.1.1 Estimativa da termografia de superfície terrestre (TST)

Segundo Jensen (2006) a temperatura superficial pode ser obtida por meio do sensoramento remoto, visto que o calor dado internamente por um alvo é transformado em energia radiante, que por sua vez mantém correlação positiva com a temperatura cinética. Por sua sensibilidade à participação dos fluxos de calor sensível e latente à superfície, é de suma importância para o entendimento das interações superfície terrestre-atmosfera (NORMAN et al., 1995).

Em razão das condições atmosféricas (fumaça, quantidade de nuvens que recobre a superfície, gases atmosféricos, entre outros), tanto a estimativa da banda termal como o cálculo de demais índices de superfície com base nos dados do LANDSAT (sensor passivo) apresentam limitações se realizados diretamente. Isso decorre visto que os constituintes atmosféricos influenciam tanto a radiação termal emitida como a radiação solar refletida, devido aos efeitos de absorção e espalhamento, resultando em análises espectrais errôneas (WEISS et al., 2015).

Técnicas de pré-processamento de imagem digital (PDI) transformam os dados sucessivamente, aprimorando seu aspecto visual e facilitando a extração de

informações de uma cena, ao amenizar os ruídos produzidos na radiância pela atmosfera (ALBUQUERQUE, 2000). Destaca-se, assim, a correção atmosférica, que segundo Gomes et al. (2012), divide-se em correção radiométrica e método físico. Nesse sentido, é imprescindível incorporá-la no uso das bandas termais para se estimar a real temperatura cinética da superfície; negligenciar a correção resultará em respostas mascaradas de temperaturas (BARSÍ et al., 2005);.

A correção radiométrica é um procedimento antecessor fundamental para obtenção de informações quantitativas. Consiste em transformar os dados brutos dos números digitais (ND's) em radiância espectral TOA. Essa transformação foi realizada conforme a equação disponibilizada pelo USGS (Equação 8). Os elementos e valores da fórmula de conversão foram extraídos dos metadados da imagem do LANDSAT-8, banda 10 (Quadro 5).

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (8)$$

Quadro 5 - Elementos e valores de conversão de ND's para radiância espectral TOA.

$L\lambda$	Radiância espectral do sensor de abertura em Watts/ m ² *sr*μm
ML	Fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 = 3.3420E-04
AL	Fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10 = 0.10000
Q_{cal}	Valor quantizado calibrado pelo pixel em DN = Imagem banda 10

Fonte: USGS, 2014. Organizado pela autora (2019).

Para o método físico, conforme a equação 9 de Barsi et al. (2003; 2005) é necessário conhecer os parâmetros corretivo da atmosfera e do processo de interação radiação-atmosfera-superfície: transmitância do ar (τ), radiância emitida (L_u) e recebida (L_d) pela superfície (Quadro 6). Esses três parâmetros são essenciais para inferir radiância de um alvo negro e, conseqüentemente, a temperatura cinética da superfície para cada pixel da cena (PIRES; FERREIRA JUNIOR, 2015; PAVÃO, 2016; SOUZA, 2017; ANGELINI, 2018; LUZ et al., 2020).

$$L_T = \frac{L_{TOA} - L_u - (1 - \varepsilon) * L_d}{\tau * \varepsilon} \quad (9)$$

Quadro 6 - Elementos necessários para a eliminação de ruídos na atmosfera.

L_T	Radiância de um alvo negro de temperatura cinética em Watts/m ² *sr*μm
L_{TOA}	Radiância espectral em Watts / m ² *sr*μm
L_d	Radiância recebida pela superfície em Watts/ m ² *sr*μm
L_u	Radiância emitida pela superfície em Watts/ m ² *sr*μm
τ	Transmissividade da atmosfera em Watts/ m ² *sr*μm
ϵ	Emissividade específica para cada tipo de superfície

Fonte: USGS, 2014. Organizado pela autora (2019).

Não obstante, tradicionalmente obtê-los têm sido difícil e demorado. Segundo Barsi et al. (2005), os usuários precisam saber onde obter os dados atmosféricos, convertê-los no formato adequado para um modelo de transferência radiativa e integrar os resultados através da passagem de banda. Nesse contexto, uma ferramenta automatizada de correção atmosférica foi desenvolvida para bandas térmicas dos sensores TM, ETM+ e TIRS pelo Escritório de Ciência do Projeto Satélite “Centro de Voo Espacial Goddard” da NASA (NASA/GSFC). A Calculadora de Parâmetros de Correção Atmosférica usa os perfis globais atmosféricos gerados pelo Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP) que incorpora dados específicos de data, hora e local do satélite e das condições de superfície: altitude (Km), temperatura (°C), pressão (mb) e umidade relativa do ar (%). Usando o código de transferência radiativa MODTRAN e um conjunto de algoritmos de integração, deriva os parâmetros de calibração atmosférica (τ , L_u e L_d) (BARSÍ et al., 2003; 2005).

A calculadora foi validada em 2005, a partir de ajustes no *software* mediante comparação de resultados junto a NASA/Laboratório de Propulsão a Jato e Instituto de Tecnologia de Rochester, que utilizam métodos similares para a calibração do LANDSAT (BARSÍ et al., 2005). O acesso à ferramenta ocorreu pela página da NASA/GSFC (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>). Os dados de superfície foram adquiridos junto à Seção de Armazenamento de Dados Meteorológico (SADMET) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referente à Estação Meteorológica Automática de Forte de Copacabana/RJ – latitude 22°59'S e longitude 43°11'W - estação oficial mais próxima da área de estudo e que apresenta o mesmo contexto geográfico. Na Tabela 3, estão categorizados os dados de entrada e saída da calculadora.

Tabela 3 - Dados de entrada e saída para a correção dos efeitos da atmosfera sobre a radiação.

Dados de entrada												Dados de saída			
Data da passagem		Latitude (Center latitude dec)	Longitude (Center longitude dec)	Horário central (UTC)	Altitude (km)	Pressão (mb)	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	T	Lu	Ld				
Verão	09/01/2014	-23.11261	-43.40897	12:53:00	0.045	1010.1	27.0	71	0.62	3.26	5.04				
	25/01/2014	-23.11282	-43.41013	12:52:51	0.045	1006.3	29.5	71	0.62	3.52	5.36				
	10/02/2014	-23.1127	-43.40034	12:52:38	0.045	1010.4	27.8	59	0.72	2.52	3.99				
	26/02/2014	-23.11259	-43.39614	12:52:25	0.045	1009.4	27.3	63	0.69	2.73	4.29				
	27/12/2014	-23.11276	-43.4013	12:51:48	0.045	1011.3	31.1	55	0.70	2.81	4.44				
	12/01/2015	-23.11261	-43.40866	12:51:46	0.045	1009.2	35.1	54	0.51	4.55	6.80				
	13/02/2015	-23.11264	-43.39352	12:51:32	0.045	1010.8	33.3	61	0.57	4.03	6.09				
	31/01/2016	-23.11245	-43.41182	12:51:47	0.045	1011.4	28.1	72	0.59	3.63	5.49				
	18/02/2017	-23.11288	-43.39885	12:51:39	0.045	1010.2	27.7	66	0.70	2.74	4.29				
	22/12/2018	-23.11265	-43.39956	12:51:36	0.045	1005.7	30.9	61	0.51	4.22	6.35				
	24/02/2019	-23.11251	-43.38885	12:51:26	0.045	1005.3	33.4	63	0.43	4.92	7.32				
Inverno	02/08/2013	-23.11286	-43.41421	12:53:44	0.045	1013.9	23.8	66	0.76	2.05	3.28				
	21/08/2014	-23.11276	-43.41806	12:51:48	0.045	1018.7	22.8	69	0.78	1.90	3.04				
	26/08/2016	-23.11292	-43.41051	12:51:53	0.045	1016.5	23.3	57	0.80	1.48	2.81				
	14/09/2017	-23.11264	-43.40127	12:51:50	0.045	1015.2	28.1	45	0.80	1.59	2.91				
	29/06/2018	-23.11258	-43.41623	12:50:46	0.045	1016.7	25.0	54	0.78	1.81	2.96				
	15/07/2018	-23.11267	-43.41131	12:51	0.045	1015.8	23.3	77	0.73	2.34	3.68				
	01/09/2018	-23.11269	-43.41087	12:51:17	0.045	1011.4	24.4	77	0.64	2.67	4.66				
	02/07/2019	-23.11293	-43.42186	12:51:38	0.045	1008.5	24.6	80	0.67	2.76	4.38				

Fonte: USGS e INMET (2014; 2015; 2016; 2017; 2018; 2019). Organizado pela autora (2019).

Foi necessário também o reconhecimento da emissividade específica do tipo de superfície. Segundo Van de Griend; Owe (1993), uma relação entre a emissividade e o NDVI pode ser expressa pela Equação 10, quando o NDVI varia de 0.157 até 0.727. Optou-se por seguir o método de estimativa completa de emissividade de superfície de Zhang et al. (2006), que além de adotar Van de Griend; Owe (1993) engloba classes mais detalhadas de NDVI (Tabela 4).

$$E_i = 1.0094 + 0.047 * \ln(\text{NDVI}) \quad (10)$$

Tabela 4 - Estimativa da emissividade usando o NDVI.

NDVI	Emissividade de superfície (E _i)
NDVI < -0.185	0.995
-0.185 ≤ NDVI < 0.157	0.970
0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727	1.0094 + 0.047ln(NDVI)
NDVI > 0.727	0.990

Fonte: ZHANG et al., 2006.

O *Normalized Difference Vegetation Index* (IVDN) ou NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada é utilizado para analisar a condição da vegetação, sendo obtido pela razão entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo (NIR) e a reflectância do vermelho (RED), dividida, respectivamente, pela soma das mesmas, como proposto por Rouse et al. (1973) na Equação 11. Antecedendo essa álgebra matemática, as bandas 4 (RED) e 5 (NIR), das 19 imagens LANDSAT-8 da USGS, também foram submetidas a calibração radiométrica para conversão dos ND's para reflectância TOA (Equação 12) e correção da reflectância TOA para o ângulo solar (Equação 13) (Quadro 7).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{float}(\text{NIR} - \text{RED})}{\text{float}(\text{NIR} + \text{RED})} \quad (11)$$

$$\rho_{\lambda'} = M_{\rho} * Q_{\text{cal}} + A_{\rho} \quad (12)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{\text{SE}})} \quad (13)$$

Quadro 7 - Elementos e valores de conversão de ND's para reflectância e correção TOA.

$\rho\lambda'$	Refletância TOA sem correção para ângulo solar
M_p	Fator de redimensionamento multiplicativo específico das bandas 4 e 5 = 2.0000E-05
Q_{cal}	Valor quantizado calibrado pelo pixel em DN = Imagens bandas 4 e 5
A_p	Fator de redimensionamento aditivo específico das bandas 4 e 5 = -0.100000
$\rho\lambda$	Refletância TOA corrigida para o ângulo solar
θ_{SE}	Ângulo de elevação do sol local = varia, segundo cada imagem

Fonte: USGS, 2014. Organizado pela autora (2019).

Por fim, a termografia de superfície com a correção atmosférica foi dada através da inversão da função Plank (Equação 14), onde $L\lambda$ (Radiância espectral TOA) corresponde a L_T (radiância de um alvo negro), cujo resultado é expresso em Kelvin. Os valores das constantes (K_1 e K_2) referentes à banda 10, estão expostos no Quadro 8 e foram extraídos dos arquivos de metadados obtidos por meio do *download* das imagens no site da USGS. A conversão da temperatura Kelvin (K) para graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) foi contemplada com a subtração do valor da temperatura do ponto de congelamento da água ao nível do mar, que equivale a 273,15 (Equação 15).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (14)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = T - 273.15 \quad (15)$$

Quadro 8 - Elementos e valores para TST em Kelvin.

T	Temperatura efetiva no satélite em Kelvin (K)
K_2	Constante de calibração 2 = 1321.0789 (K)
K_1	Constante de calibração 1 = 774.8853 (K)
$L\lambda$	Radiância espectral em Watts/m ² sr μm

Fonte: USGS, 2014. Organizado pela autora (2019).

Para a análise da ilha de calor superficial da última década (2011 a 2020), optou-se por estimar a média das TST, dada pelas equações 16 e 17, respectivamente, para as estações de verão e inverno. Optou-se pela média da termografia de superfície terrestre tendo em vista o entendimento do padrão do

campo térmico, em diferentes episódios sazonais, ao longo da última década (2011 a 2020).

$$T_{(^{\circ}\text{C})} = \frac{T_1(^{\circ}\text{C}) + T_2(^{\circ}\text{C}) + T_3(^{\circ}\text{C}) + \dots + T_9(^{\circ}\text{C}) + T_{10}(^{\circ}\text{C}) + T_{11}(^{\circ}\text{C})}{11} \quad (16)$$

$$T_{(^{\circ}\text{C})} = \frac{T_1(^{\circ}\text{C}) + T_2(^{\circ}\text{C}) + \dots + T_7(^{\circ}\text{C}) + T_8(^{\circ}\text{C})}{8} \quad (17)$$

Finalizando esta etapa, foi realizada uma extração do recorte que corresponde ao *Central Business District* do município do Rio de Janeiro, RJ. Bem como, uma correção geométrica contemplando a modificação do datum das duas imagens resultantes para SIRGAS 2000 e Sistema de Coordenadas Projetadas UTM 23S.

3.1.2 Mapa de análise climática urbana (UC-AnMap)

O Mapa de Análise Climática Urbana ou Mapa Funcional Climático Sintético constitui uma **plataforma de informação e avaliação a respeito da inter-relação e efeitos das formas urbanas** sobre o ambiente, que são sintetizadas e ponderadas espacialmente e quantitativamente dentro de um sistema de classificação (NG et al., 2008; REN et al., 2013). Portanto, a ferramenta possibilita diagnosticar a **suscetibilidade climática urbana à manifestação da ilha de calor, partindo da estratégia holística.**

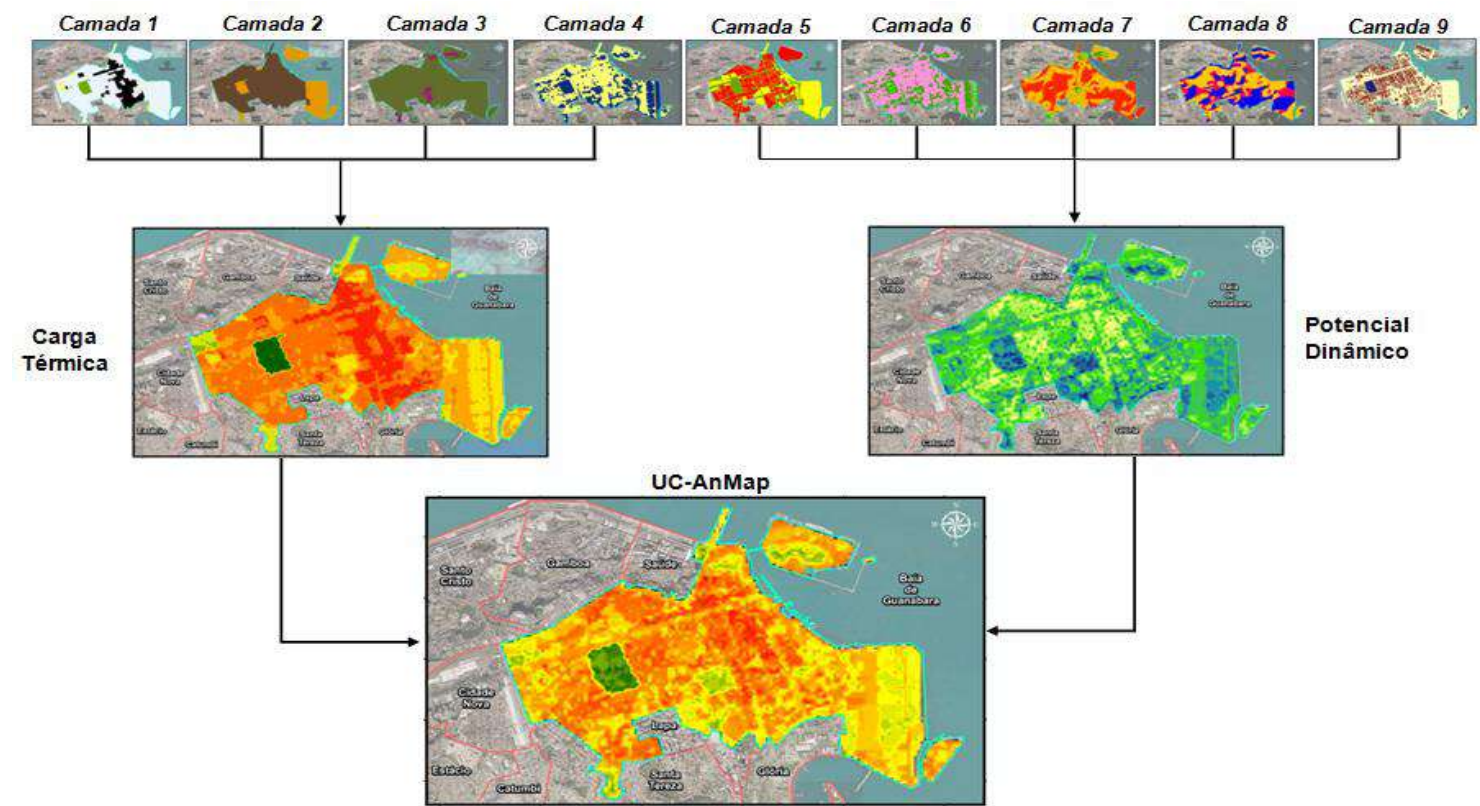
Esta etapa baseia-se na metodologia de NG et al. (2008), em que a elaboração do UC-AnMap conta com uma cuidadosa coleção de dados, convertidos em camadas, encarregados de avaliar a carga térmica (CT) e o potencial dinâmico (PD). **A carga térmica concentra-se nas camadas (formas) referentes ao sítio e desenho urbano (variáveis controláveis e incontroláveis) que contribuem para o armazenamento ou emissão de calor. Já o potencial dinâmico, na influência das camadas (formas) sobre a ventilação/troca do ar com demais espaços** (NG et al., 2009).

Partindo das considerações de Carga Térmica e Potencial Dinâmico como morfologicamente urbana, **as camadas de entradas foram sistematizadas segundo suas contribuições sinérgicas em especializar aquecimento (efeito negativo) e arrefecimento (efeitos positivos)** sobre o clima urbano do *Central Business District* do Rio de Janeiro (Quadro 9) (NG et al., 2009; FERREIRA et al., 2017; FREITAS et al., 2021). Contribuindo, portanto, na **determinação das condições termodinâmicas e inferência da ilha de calor.**

Foram determinadas nove camadas de entradas, a partir de dados vetoriais e matriciais obtidos em órgãos oficiais (cobertura e uso do solo, topográficos, edificação, zoneamento urbano, hidrografia, vegetação, imagem LANDSAT-8, entre outros). Valores de pesos positivos (efeito negativo) e negativos (efeito positivo) são atribuídos correspondendo a ganho ou perda de carga térmica e/ou potencial dinâmico, respectivamente. Essas camadas, convertidas todas em matrizes, formaram a estrutura base para a produção do UC-AnMap (NG et al., 2009) (Quadro 9).

Inicialmente, a ponderação matricial das camadas voltou-se à modelagem do cenário de Carga Térmica (potencial de ilha de calor) e Potencial Dinâmico (ilha potencial de frescor). Da mesma maneira, o Modelo Climático Urbano foi gerado pela operação da soma dos dois primeiros cenários resultantes (Figura 8).

Figura 8 - Fluxograma de construção do UC-AnMap.



Fonte: A autora (2019).

Quadro 9- Camadas utilizadas e seus respectivos efeitos sobre o clima urbano.

Carga térmica			
Efeito	Camada	Classe	Peso
EFEITO NEGATIVO	Volume edificado	Vegetação urbana	0
		Industrial	1
		Verticalização baixa (edifícios de 1 e 2 pavimentos)	2
		Subnormal	3
		Verticalização intermediária (edifícios de 3 até 10 pavimentos)	4
		Verticalizada (acima de 10 pavimentos)	5
	Uso do solo relativos a ganhos antropogênico	Baixo potencial de aquecimento (ZRM-2, ZOE, vegetação urbana e favela)	0
		Alto potencial de aquecimento (industrial (ZUM), ZCC ZCS)	1
	Altura topográfica	Acima de 100 m	1
		10 - 100 m	2
0 - 10 m		3	
EFEITO POSITIVO	Espaços verdes urbanos (efeito bioclimático)	Existem áreas verdes contidas na área urbana	-1
		Não existem áreas verdes contidas na área urbana	0
Potencial dinâmico			
Efeito	Camada	Classe	Peso
EFEITO POSITIVO	Cobertura do solo por edificação	Alto percentual (50 - 100%)	0
		Médio percentual (0 - 50%)	-1
		Não á cobertura (área impermeáveis livres)	-2
	Rugosidade das formas vegetais	Urbanização	0
		Área arborizada	-1
		Vegetação arbustiva/rasteira	-2
	Declividade	Plana	0
		Baixa (1 - 5%)	-1
		Média (6 - 40%)	-2
		Alta (acima 40%)	-3
	Orientação das vertentes	N, NE e NO	1
		L , O e plano	0
		S, SE e SO	-1
	Ventilação (comprimento da rugosidade)	Ausência de ventilação (alta rugosidade)	0
		Baixa Ventilação (baixa rugosidade)	-1
		Alta ventilação (sem rugosidade)	-2

Fonte: NG et al., 2008; NG et al., 2009; LEMOS et al., 2021.

Para melhor compreensão das etapas envolvidas na constituição do Modelo Climático Urbano, segue com detalhamento a elaboração das camadas utilizadas e as operações envolvidas:

Camada 1: volume edificado

A priori, edificação proporciona menor habilidade de liberação de ondas longas à noite devido a redução do *sky view factor*. A massa aglomerada de edifícios funciona como reservatório de energia ao condicionar reflexões múltiplas entre eles e, dependendo do arranjo, converte-se em obstáculo para as correntes de ventos (VOOGT, 2002; NG et al, 2009). Condicionando, assim, menor eficiência no desprendimento do calor.

Este mapa foi construído por meio de um conjunto de informações reunidas para o entendimento do aquecimento gerado pelo volume das edificações no *Central Business District* do Rio de Janeiro. Inicialmente, a partir do vetor de cobertura e uso do solo (2018) de escala 1:2.000 do IPP, extraiu-se as feições do Campo do Santana (vegetação urbana) e favelas. Com o vetor de altura das edificações (SIURB, 2020) de mesma escala cartográfica, estimaram-se os gabaritos dividindo as alturas por 2,5m, que diz respeito ao pé direito das construções. Essa estimativa foi necessária tendo em vista a criação de zonas de pavimentação com verticalização baixa (edifícios de 1 e 2 pavimentos), verticalização intermediária (edifícios acima de 3 até 10 pavimentos) e verticalizada (edifícios acima de 10 pavimentos).

Também foi necessário consultar o zoneamento de uso e ocupação do solo da Área de Planejamento 1 (LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, 2018), que engloba o CBD, da Câmara Municipal do Rio de Janeiro. Embasando-se na feição da área de estudo foi feita a vetorização do zoneamento conforme o projeto de lei complementar nº57/2018, também em 1:2.000. Reconheceu-se 5 zonas: a) Zona Consolidada Central (ZCC): correspondente à área central da cidade com concentração de atividades comerciais e de serviços de alcance metropolitano; b) Zona Comercial e de Serviços (ZCS): onde predominam as atividades comerciais e de prestação de serviços de alcance regional ou municipal, localizadas

preferencialmente junto aos eixos de transportes; c) Zona de Uso Misto (ZUM): onde os usos residencial, comercial, de serviço e industrial podem ocorrer sem predominância, ressalvadas as situações de impacto pertinentes à convivência entre os diferentes usos; d) Zona Residencial Multifamiliar 2 (ZRM - 2): permite algumas atividades de comércio e serviços de apoio e complementaridade ao uso residencial; e) Zona de Operações Especiais (ZOE), constituída por áreas sujeitas a regime específico, sob jurisdição pública, como áreas militares ou federais. Contudo, para a elaboração da camada de volume edificado apenas o ZUM, relacionado à forma urbana industrial, foi selecionado.

Assim sendo, a camada do volume edificado foi construída com a junção das feições da vegetação urbana, favela, zonas de pavimentações e o ZUM (referência a forma industrial). O arquivo *shapefile* foi convertido em *raster* TIFF, mantendo o tamanho da célula de 20 m. Após a conversão foi realizada uma reclassificação do raster, gerando os pesos para cada classe a seguir:

Vegetação urbana: peso 0

Industrial: peso 1

Verticalização baixa (edifícios de 1 e 2 pavimentos): peso 2

Subnormal: peso 3

Verticalização intermediária (edifícios acima de 3 até 10 pavimentos): peso 4

Verticalizada (edifícios acima de 10 pavimentos): peso 5

Camada 2: uso do solo relativo a ganhos antropogênicos

Determinadas atividades demandam maiores consumos de eletricidade e gás, evidenciando maior liberação de calor (TAHA, 1997; RIZWAN et al., 2007). Neste sentido, foi estabelecida duas classes quanto aos ganhos antropogênicos no CBD, tendo por base seus usos. Partindo de reclassificações e utilização de dados gerados para o mapa anterior estabeleceu-se, assim, as classes de:

Alto potencial de aquecimento (industrial (ZUM), ZCC ZCS): peso 1

Baixo potencial de aquecimento (ZRM-2, ZOE, vegetação urbana e favela): peso 0

Camada 3: altura topográfica

A temperatura do ar decresce conforme a elevação topográfica em virtude do resfriamento adiabático e da turbulência. Esses processos são responsáveis pelo decréscimo a cada 100 metros de cerca de 1º Celsius (GOLANY, 1996). Por outro lado, a rugosidade reduz o movimento do ar e, por conseguinte, o efeito da ilha de calor urbana é maior nos valores mais baixos de altura topográfica (HESSEN, 1996), sendo mais expressivo abaixo de 10 metros.

Com o uso dos *shapefiles* de ponto cotado (2018) de escala 1:25.000 (IBGE), curvas de nível e hidrografia, ambos de escala 1:2.000 (Subsecretaria de Meio Ambiente – Prefeitura do Rio de Janeiro)), elaborou-se o Modelo Digital de Terreno Hidrologicamente Consistente (MDT HC).

O MDT HC é um modelo de topográfico, que além de utilizar os dados altimétricos (pontos cotados e curvas de nível), incorpora também a hidrografia para fazer a suavização do terreno. De acordo com Huntingon (1989) os dados altimétricos são interpolados para o formato de pixel, que é suavizado por onde passam os leitos das drenagens. Utilizou-se para esta finalidade a operação *Topo to raster* do *3D Analyst Tool*.

Embora não haja grandes elevações no espaço urbano do CBD, devido os desmontes dos morros, considerou-se este componente por ser de extrema relevância na formação da ilha de calor. Foram estabelecidas 3 classes de altura topográfica:

Altura topográfica de 0 a 10 m: peso 3

Altura topográfica de 10 a 100 m: peso 2

Altura topográfica de acima de 100 m: peso 1

Camada 4: áreas verdes urbanas (efeito bioclimático)

O efeito bioclimático contribui para a atenuação da temperatura do ar por meio da evapotranspiração e do sombreamento da vegetação (NG et. al, 2009). O

arrefecimento promovido pela evapotranspiração adiciona 0,5K (-268,15 °C) ao efeito causado pelo sombreamento (SHASHUA-BAR; HOFFMAN, 2000). Em geral, cada 100m² de área adicionada como parque, reduz em média 1K (-272,15 °C) na temperatura do ar (DIMOUDI; NIKOLOPOULOU, 2003). Além disso, é possível sentir os efeitos de resfriamento em até 100 m, dependendo das obstruções (SHASHUA-BAR; HOFFMAN, 2000; DIMOUDI; NIKOLOPOULOU, 2003). Portanto, a extensão e a distribuição da vegetação são importantes por impactar na carga térmica (NG et al., 2009).

Para a identificação dos efeitos bioclimáticos utilizou-se o índice de área foliar (IAF) partindo de uma cena de imagem LANDSAT-8 do dia 22 de dezembro de 2018, obtida no site do USGS. O IAF é um indicador de biomassa de cada pixel da imagem que é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação (m² folhas/m² solo). O índice permite relacionar a biomassa foliar as trocas térmicas úmidas (calor latente advindo da evapotranspiração).

Inicialmente, foi necessária a conversão do ND's das imagens das bandas 4 e 5 para reflectância TOA (Equação 12), bem como as correções das reflectâncias das bandas supracitadas (Equação 13). Em seguida, com as reflectâncias devidamente corrigidas, calculou-se o índice de vegetação ajustado para correção dos efeitos do solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI), conforme Huete (1988) (Equação 18). Embora seja variável segundo o grau de fechamento do dossel, o valor mais frequente de ajuste (L) é 0,5 (HUETE; WARRICK, 1990; ACCIOLY et al., 2002; BOEGH et al., 2002; SILVA et al., 2005). Ao incluí-lo, o SAVI reduz a influência da resposta espectral do solo permitindo uma melhoria na interpretação das variáveis da vegetação.

Assim, o IAF foi estimado tendo o SAVI por base conforme a equação empírica proposta por Allen et al. (2002) (Equação 19). Duas classes foram criadas mediante o intervalo de valor do IAF, conforme Oliveira et al. (2019): a) com vegetação (0,1 a 1,5) e sem vegetação (-0,48 a 0,1). Os seguintes pesos foram relacionados:

Existem áreas verdes contidas na área urbana: peso -1

Não existem áreas verdes contidas na área urbana: peso 0

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot (NIR-RED)}{(L + NIR-RED)} \quad (18)$$

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0.69-SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (19)$$

Camada 5: cobertura do solo por edificação

O aumento da rugosidade implica em efeitos sobre a ventilação urbana, tais como a redução na velocidade do vento. Por outro lado, quanto menor a porcentagem de edifício, maior a permeabilidade urbana e maior será a velocidade do vento na UCL (NG et. al, 2009).

Com o emprego da intersecção dos arquivos *shapefiles* de quadras (2018) e edificações (2018), ambos de escala cartográfica 1:2.000 do SIURB - Prefeitura do Rio de Janeiro, gerou-se um vetor que espacializa as edificações por quadra. Este dado juntamente com o limite do *Central Business District* serviu de base para extrair os logradouros. Houve a necessidade da aquisição dos logradouros seguindo esse procedimento tendo em vista a disponibilidade desta informação em órgãos oficiais apenas como *shapefile* em formato de linha.

Atentando-se à interferência das edificações urbanas sobre as condições de ventilação, sistematizaram-se três classes em decorrência do potencial de arrefecimento. O dado vetorial foi convertido em matriz, apresentando classes e pesos a seguir:

Baixo potencial de ventilação - alto percentual de cobertura do solo por edifícios (entre 50 e 100%): peso 0

Médio potencial de ventilação - médio percentual de cobertura do solo por edifícios (entre 0 e 50%): peso -1

Alto potencial de ventilação: não há cobertura do solo por edifícios (áreas impermeáveis livres): peso -2

Camada 6: rugosidade das formas vegetais

Algumas formas vegetais possuem baixa rugosidade e consequentemente maior potencial dinâmico do que paisagens urbanas e formas arbóreas (NG et al., 2009). Com base no intervalo do IAF distinguiram-se as características da vegetação, conforme a adaptação de Oliveira et al. (2019), sistematizando-as em: a) vegetação arbórea (0.7 a 1.5); b) vegetação arbustiva/rasteira (0.1 a 0.7); c) urbano (-0.48 a 0.1). Os seguintes pesos foram estipulados, segundo seu contributo ao potencial dinâmico:

Urbano: peso 0

Vegetação arbórea: peso -1

Vegetação arbustiva/rasteira: peso -2

Camada 7: declividade

Variações locais da declividade influenciam na dinâmica de ventilação através do movimento do ar. Os ventos catabáticos (ventos frios), descendentes das encostas, à noite, em decorrência do balanço negativo de radiação, exercem redução da temperatura nas áreas localizadas na base dos declives. Ocorrem frequentemente ao longo de vales estreitos e declives acentuados (REN et al., 2009; REN et al., 2013). Nesse contexto, a declividade é uma influenciadora do potencial dinâmico.

Com o Modelo Digital de Terreno elaborado para o mapa de altimetria calculou-se a declividade em percentagem. Para a operação acionou-se a ferramenta *Slope* do *3D Analyst Tool*. O raster de saída foi classificado em 4 classes:

Indiferente (plana): peso 0

Baixa declividade (de 1 a 5%): peso -1

Média declividade (de 6 a 40%): peso -2

Alta declividade (acima de 40%): peso -3

Camada 8: orientação das vertentes

A orientação da vertente fornece um interessante indicativo de exposição à radiação solar, influenciando na temperatura do ar (GOLANY, 1996). No hemisfério sul, as encostas voltadas para o norte recebem radiação mais intensa, aquecendo-se mais. Enquanto as encostas com orientação sul recebem menos exposição e contribuem mais para o arrefecimento.

Outro elemento influenciado pela orientação é o vento, capaz de gerar arrefecimento das temperaturas e amenizar desconforto térmico. Além disso, vertentes direcionadas para a entrada de ventos no *Central Business District* possuem condições de arrefecimento para as ilhas de calor urbanas (LIMA JÚNIOR, 2018).

O Modelo Digital de Terreno também serviu de base para calcular a orientação da encosta partindo da ferramenta *Aspec* do *3D Analyst Tool*. Estipulou-se 3 classes, as quais as designações dos pesos encontram-se relacionadas às suas contribuições ao potencial dinâmico. São elas:

N, NE e NO: peso 1

L, O e plano: peso 0

S, SE e SO: peso -1

Camada 9: ventilação (comprimento de rugosidade)

O movimento do ar e a ventilação urbana são essenciais para a redução da temperatura. De acordo com o tipo de cobertura do solo há maior ou menor comprimento de rugosidade, o qual influencia no potencial de arrefecimento. Consideram-se aqui os diferentes comprimentos de rugosidade para tratar da ventilação e entender o potencial de arrefecimento no ambiente urbano.

Para o mapa de ventilação, relacionado ao comprimento de rugosidade, foi realizada a reclassificação dos arquivos produzidos para o mapa de cobertura do solo por edificação. O *raster* resultante da conversão do arquivo *shapefile* teve como base a determinação das classes e pesos abaixo:

Áreas de alto comprimento de rugosidade/áreas edificadas independente da quantidade de pavimentos (caracterizadas pela ausência de ventilação): peso 0

Áreas de baixo comprimento de rugosidade/áreas impermeabilizadas não edificadas com as vias (caracterizada pela baixa ventilação): peso -1

Áreas sem comprimento de rugosidade/áreas verdes não edificadas (caracterizadas pela alta ventilação): peso -2

Mapa climático urbano (UC-AnMap)

Com a sobreposição dos mapas de volume edificado, uso do solo relativo aos ganhos antropogênicos, altimetria e efeitos bioclimáticos, chegou-se ao mapa de carga térmica, refletindo a capacidade de armazenamento ou emissão de calor do *Central Business District*. A integração dos mapas de cobertura do solo por edificação, rugosidade das formas vegetais, declividade, orientação das vertentes e ventilação resultou no mapa de potencial dinâmico, espacializando as influências das formas urbanas na dinâmica do ar. Para a criação do Mapa de Análise Climática Urbana somaram-se os valores de classificação existentes nas camadas de carga térmica (CT) e potencial dinâmico (PD) processando o *raster calculator*.

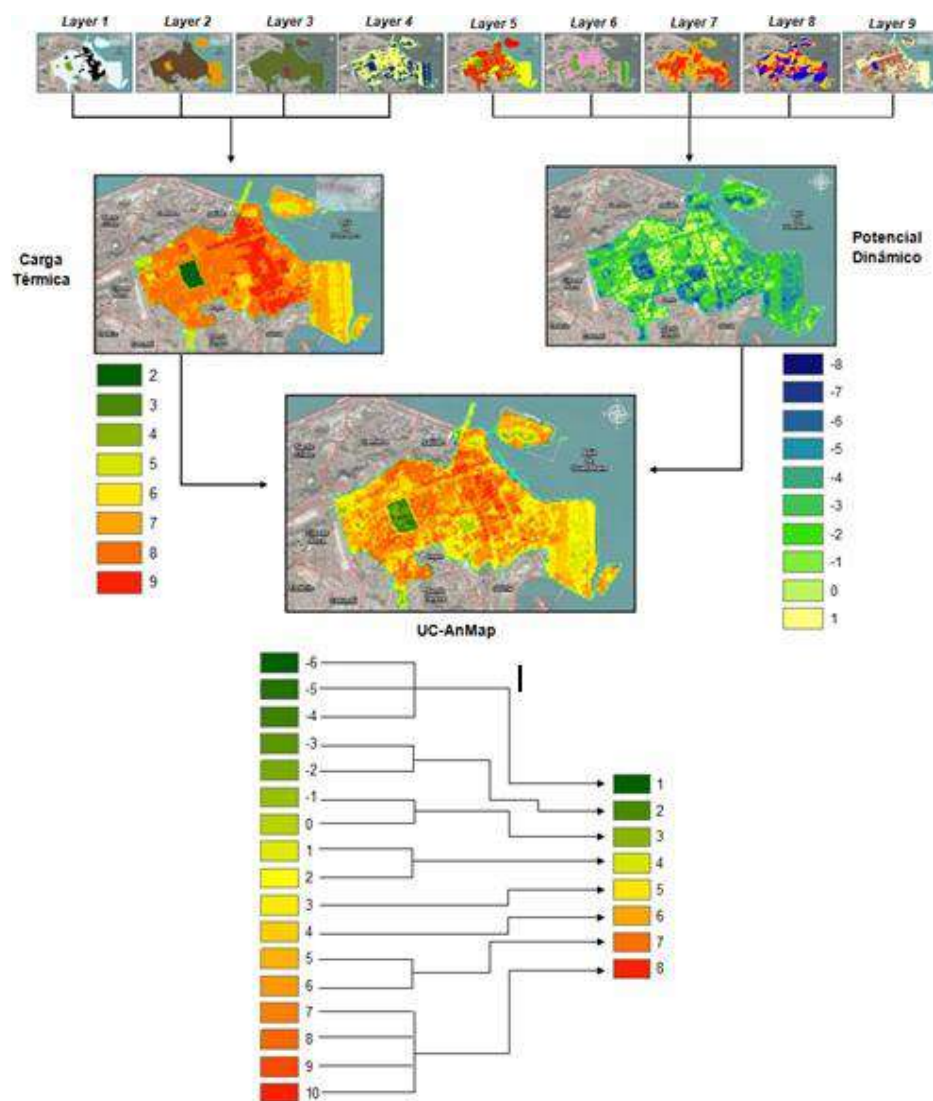
No que se refere à adição da carga térmica e do potencial dinâmico, o UC-AnMap inicial resultou em 17 categorias numa escala de valores que variou de -6 a 10. Com o propósito de facilitar o entendimento dos efeitos negativos e positivos dessas camadas sobre o clima urbano do CBD, os valores da escala foram reclassificados e agrupados **tomando como referência** as classes da Temperatura Equivalente Fisiológica – PET¹³. A PET é um índice térmico que sinaliza **oito classes climáticas urbanas de aquecimento ou resfriamento do ar**

¹³ Cabe reforçar que a PET não foi aplicada neste estudo, apenas suas classes serviram de referência para a classificação categorica.

(suscetibilidade climática) e efeitos prováveis sobre o conforto humano (NG et al., 2008; LIMA JUNIOR, 2018). São elas: classe 1 – resfriamento do ar; classe 2 – renovação e circulação do ar; classe 3 – atividade climática baixa; classe 4 – atividade climática relevante; classe 5 – carga térmica baixa; classe 6 – carga térmica relevante; classe 7 – carga térmica alta; e classe 8 – ilha de calor.

Dessa maneira, as 17 classes iniciais foram reclassificadas em 8 de acordo com as quebras naturais, cujos valores extremos são simplificados e agrupados, enquanto os valores médios são mantidos. Foram agrupados e reclassificados os seguintes valores: -6 a -4 como classe 1; -3 a -2 como classe 2; -1 a 0 como classe 3; 1 a 2 como classe 4; 3 como classe 5; 4 como classe 6; 5 a 6 como classe 7; 7 a 10 como classe 8 (Figura 9).

Figura 9 - Fluxograma de elaboração do Mapa de Análise Climática Urbana.



Fonte: A autora (2019).

3.1.3 Definição dos pontos de coletas de dados

A escolha dos pontos amostrais distribuídos no CBD, para a compreensão da estrutura tridimensional (horizontal e vertical da atmosfera urbana inferior do *canyon*), foi feita a partir da análise e confrontação da TST e do UC-AnMp. A TST infere a ilha de calor de superfície, enquanto o UC-AnMap espacializa o potencial de aquecimento (identificando áreas suscetíveis à ilha de calor) e resfriamento (áreas suscetíveis à ilha de frescor). Logo, o processamento entre os dois mapas é estratégico.

Essa seleção cumpre a ideia de adentrar o espaço do *Central Business Distric*, seguindo a proposta teórico-metodológica de Monteiro (1976; 1990). Possibilitando, dessa maneira, uma **análise têmporo-espacial, a qual é capaz de revelar a influência das várias possibilidades de articulações dos componentes espaciais sobre a variabilidade térmica.**

A partir da confrontação da TST e do UC-AnMap, identificaram-se um total de 36 pontos distribuídos entre logradouros e/ou ambientes que contemplassem diferentes níveis de suscetibilidade climática, monitoramento não executado devido ao agravamento da pandemia no município do Rio de Janeiro. Entretanto, chamou atenção a diferença de resultado obtido entre as duas metodologias de avaliação para o *canyon* da avenida Rio Branco (ilha de frescor segundo a termografia de superfície e ilha de calor segundo o UC-AnMap). Mesmo que essa diferença esteja relacionada à diferença metodológica (e de pressupostos balizadoras), bem como do período do imageamento (manhã), o detalhamento da configuração térmica do *canyon* da avenida Rio Branco assumiu relevância para avaliação da variabilidade temporo-espacial e vertical do campo térmico do CDB do Rio de Janeiro

3.2 Segunda etapa: experimento de campo

Na segunda etapa, com os pontos amostrais já selecionados, foram realizados os experimentos de campo em episódios sazonal de verão durante os dias **24/01/2021 (domingo), 25/01/2021 (segunda-feira), 31/01/2021 (domingo),**

07/02/2021 (domingo), 14/02/2021 (domingo), 21/02/2021 (domingo), 22/02/2021 (segunda-feira), 07/03/2021 (domingo), 14/03/2021 (domingo) e 15/03/2021 (segunda-feira). Frisa-se que a metodologia inicial contemplava períodos sazonais contrastantes: inverno de 2020 e verão de 2021. Porém, a pandemia do COVID-19 também impossibilitou os experimentos durante os episódios de inverno, em 2020.

Durante o experimento de campo, **as sondagens aconteceram *in situ* (1,5 m) e do chão até 50 metros, para a compreensão das configurações térmicas horizontal e vertical da UCL do CBD, respectivamente.** As medições *in situ* abarcavam 7 pontos distribuídos ao longo de 2 transectos móveis (sentido sul-norte e norte-sul) e 1 estação meteorológica de controle (1,5 m). Enquanto, as mensurações verticais da *urban canopy layer* aconteceram em 1 ponto amostral com uso de RPA.

As coletas dos dados microclimáticos dos transectos móveis com bicicleta, foram com o termo-anemômetro digital incoterm T-ANE-0030.00¹⁴ (Figura 10). Também foi observada a direção do vento, por meio de uma fita amarrada ao termo-anemômetro, e a cobertura do céu exatamente acima de cada ponto amostral. No ponto de controle foi alocada a estação meteorológica profissional sem fio, com memória e com conexão USB-PC NOVOTEST 1041¹⁵ (Figura 11), que coleta dados de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, pressão atmosférica e vento (velocidade e direção).

Para as coletas verticais de temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um *datalogger* IP-747 Impac¹⁶ devidamente acoplado (Figura 12) no centro de massa da RPA, conforme orientação de Abbichandani et al. (2020) que ao levantar voo, registrou os elementos climáticos, sequencialmente, no chão, em 10 metros, 20 metros, 30 metros, 40 metros e 50 metros (posições altimétricas georreferenciadas pelo GPS da aeronave). Essas posições altimétricas foram definidas com base na autonomia da bateria da RPA e por ser subunidade de valor de referência da taxa adiabática, amplamente difundido na literatura. O *datalogger* foi programado para registrar as informações a cada 10 segundos.

¹⁴ A calibração foi realizada pelo laboratório da Tecnocalibração por meio de método comparativo, utilizando o termohigrômetro digital calibrado por Visomes, válido até 3/2022.

¹⁵ A calibração foi realizada pelo laboratório da Tecnocalibração por meio de método comparativo, utilizando o termohigrômetro digital calibrado por Visomes, válido até 3/2022.

Figura 10 - Termo-anemômetro. Figura 11 - Estação meteorológica. Figura 12 – *Datalogger*.



Ressalta-se que as medições iniciaram com RPA *Gkalione x487 ultra 2020* (Figura 13), que permanecia em cada posição durante 1 minuto para a coleta. Contudo, a mesma foi danificada, possivelmente por não suportar no tempo de voo o peso do *datalogger*, fato que fez com que a aeronave descarregasse rapidamente e despencasse. Tendo em vista esse imprevisto, não foi possível proceder com a coleta em alguns momentos: 31 de janeiro às 13 horas e 14 de fevereiro. Sendo assim, foi necessário substituí-la pela RPA da série *DJI GO phantom 4* (Figura 14), cuja autonomia da bateria é superior, sustentando maior tempo de voo. O tempo de espera em capa altura garantiu que o sensor do *datalogger* entrasse em equilíbrio com o ambiente para os registros.

Figura 13 - RPA *Gkalione x487 ultra 2020*.

Figura 14 - RPA da série *DJI GO phantom 4*.



Visando a segurança dos transeuntes, devido à suspensão da RPA, os experimentos de campos com esse equipamento foram realizados apenas aos domingos. Ciente de que esse é o dia de menor fluxo no CBD, foi escolhido outro dia

da semana que melhor representasse a sua dinâmica para ampliar a análise. Sendo assim, foram escolhidas sempre as últimas segundas-feiras dos meses de janeiro, fevereiro e março, onde foram realizadas apenas coletas via transects móveis e estação meteorológica.

Durante os experimentos, os transectos móveis e a RPA coletaram dados às 6h, 13h e 20 horas e de forma simultânea¹⁷. Esses horários estão relacionados, respectivamente, ao início do processo de aquecimento, máximo de aquecimento e início do resfriamento. As coletas duraram no máximo 30 minutos para garantir a persistência das mesmas condições atmosférica. Em relação às coletas horizontais, antes de proceder com os registros foi necessário aguardar 1 minuto para que o sensor do termo-anemômetro entrasse em equilíbrio com o ambiente.

Já a estação de controle, cujos dados foram capturados de 15 em 15 minutos, começou a gravar as observações a partir das 5 horas e 30 minutos e cessaram às 20 horas e 30 minutos. Isso se deve a necessidade de entender a resposta local em relação aos elementos climáticos, mediante a circulação atmosférica regional, antes (5:30), durante (6:00 às 20:00) e pós-sondagem (20:30) dos experimentos.

Também foram baixados junto à Seção de Armazenamento de Dados do INMET (<https://bdmep.inmet.gov.br/>) os dados climáticos referentes à Estação Meteorológica Automática do Forte de Copacabana para fins de comparação e validação dos dados coletados pela a estação meteorológica de controle. A estação foi selecionada como referência uma vez que, além de mais próxima da área de estudo, se encontra no mesmo contexto geográfico que o *Central Business District*.

3.3 Terceira etapa: pós-campo

Os registros dos experimentos de campo (**24/01/2021, 25/01/2021, 31/01/2021, 07/02/2021, 14/02/2021, 21/02/2021, 22/02/2021, 07/03/2021, 14/03/2021 e 15/03/2021**) foram tabulados, organizados e integrados em planilha do

¹⁷ A única exceção foi o dia 22/02, devido ao elevado total pluviométrico registrado na área de estudo no horário da coleta das 13 horas, sendo necessário postergar a sondagem para às 13:30, ou seja, o pós-chuva.

Microsoft Office Excel 2007, visando gerar resultados para alcançar os objetivos propostos pela pesquisa.

Com os dados de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, pressão atmosférica e vento (velocidade e direção) da estação meteorológica organizou-se uma tabela contendo os registros instantâneos dos horários de 5:30, 6:00, 7:00, 8:00, 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00 16:00, 17:00 18:00, 19:00, 20:00 e 20:30. Com essas informações foram construídos, no *Microsoft Office Excel 2007*, gráficos diários para a análise rítmica do comportamento das condições atmosféricas (elementos atmosféricos) e, sobretudo, para a análise de seu rebatimento sobre o campo térmico.

Os dados horários das 6, 13 e 20 horas da estação meteorológica serviram de comparação para os monitoramentos horizontais realizados também nos referidos períodos. Especificamente, os valores de temperatura do ar da estação constituíram referência para a subtração e identificação da intensidade da ilha de calor. A opção pela alocação da estação meteorológica de referência do estudo no aeroporto Santos Dumont, é embasada pela literatura supracitada, aquele espaço intraurbano do CDB com melhor condição de retratar a atmosfera regional, minorando as interferências do urbano.

A tabela com monitoramento horizontal, contendo as medidas de diferenças térmicas, foi levada ao *software Arcgis 10.5*, onde foi possível mapear a configuração térmica ao longo dos transectos 1 e 2. A tabela com o monitoramento horizontal também serviu de base para a identificação e subtração entre os valores de maior e menor temperatura de cada ponto amostral, visando o cálculo da taxa de aquecimento (maior ou menor eficiência no ganho de energia) de cada ponto amostral ao longo de um dia.

Já o monitoramento térmico e higrométrico vertical, do chão até 50 metros, com os valores de temperatura do ar e umidade relativa, foi obtido mediante gráficos produzidos também no *Excel 2007*.

Por fim, para qualificar o variabilidade do campo térmico e compreendê-lo sob as condições de processos atmosféricos distintos, foi necessária a aquisição de cartas sinóticas (00Z e 12Z) da Marinha do Brasil (<https://www.marinha.mil.br/chm/>), imagens do canal 13 do satélite GOES 16 (00 GMT e 12GMT), disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>), e do gráfico de

radiossonda (00 UTC e 12 UTC) captado pela estação existente no Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão), na página de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá (<https://meteorologia.unifei.edu.br/>).

As cartas servem de base para interpretação visual e reconhecimento dos sistemas atmosféricos e massas de ar predominantes nos dias dos experimentos de campo e, conseqüentemente, compreensão da repercussão das condições sinóticas sobre o comportamento dos elementos atmosféricos registrados pela estação meteorológica de referência. As imagens do GOES – 16 corresponde ao canal do Infra-vermelho 1 (IR-1, com 10.35μ) e através do canal 13 é possível identificar a temperatura do topo das nuvens e, com isso, inferir seu nível de desenvolvimento vertical. Ambos contribuem para o conhecimento das condições de tempo que favorecem as diferentes intensidades de ilhas de calor.

Os insumos acima, quando associados aos gráficos de radiossonda que fornecem índices termodinâmicos da atmosfera regional, possibilitam uma análise abrangente dos processos atmosféricos. Os índices de radiossondagem oferecem valores numéricos que expressam e confirmam a condição de equilíbrio estável ou instável da atmosfera. Os índices termodinâmicos mais utilizados em centros de previsão de tempo são: índice K, energia potencial convectiva disponível (CAPE) e total totals (TT) (DIAS, 2008).

O Índice K [$^{\circ}\text{C}$] pode ser interpretado como uma medida do potencial de instabilidade baseado na taxa vertical de variação de temperatura, no conteúdo de umidade na baixa troposfera e na extensão vertical da camada úmida. Quanto mais positivo este índice, maior será a chance de tempestades, ou seja, maior a instabilidade atmosférica (Tabela 5) (DIAS, 2008).

Tabela 5 - Probabilidade de formação de tormenta com o Índice K.

Valor de K	Probabilidade de tormentas
$K < 20$	Nenhuma
$20 < K < 25$	Tormentas isoladas
$25 < K < 30$	Tormentas amplamente dispersas
$30 < K < 35$	Tormenta dispersas
$35 < K < 40$	Muitas tormentas

Fonte: DIAS, 2008.

Já a Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) [J kg⁻¹] mede a energia potencial disponível para a convecção a partir do nível da base da nuvem até uma determinada altura na atmosfera (Tabela 6). Enquanto o índice TT é utilizado para identificar potenciais áreas com desenvolvimento de tormentas convectivas (Tabela 7). Abaixo estão listadas as características dos referidos índices (DIAS, 2008).

Tabela 6 - Probabilidade de formação de tormenta com o Índice CAPE.

CAPE	Probabilidade de formar tormentas
0 a 1000	Marginalmente instável
1000 a 2500	Moderadamente instável
2500 a 4000	Acentuadamente instável
> 4000	Extremamente instável

Fonte: DIAS, 2008.

Tabela 7 - Probabilidade de formação de tormenta com o Índice TT.

TT	Atividade convectiva
TT < 44	Potencial fraco
44 < T < 50	Tormentas moderadas
50 < TT < 55	Tormentas fortes
TT > 50	Tormentas muito fortes

Fonte: DIAS, 2008.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

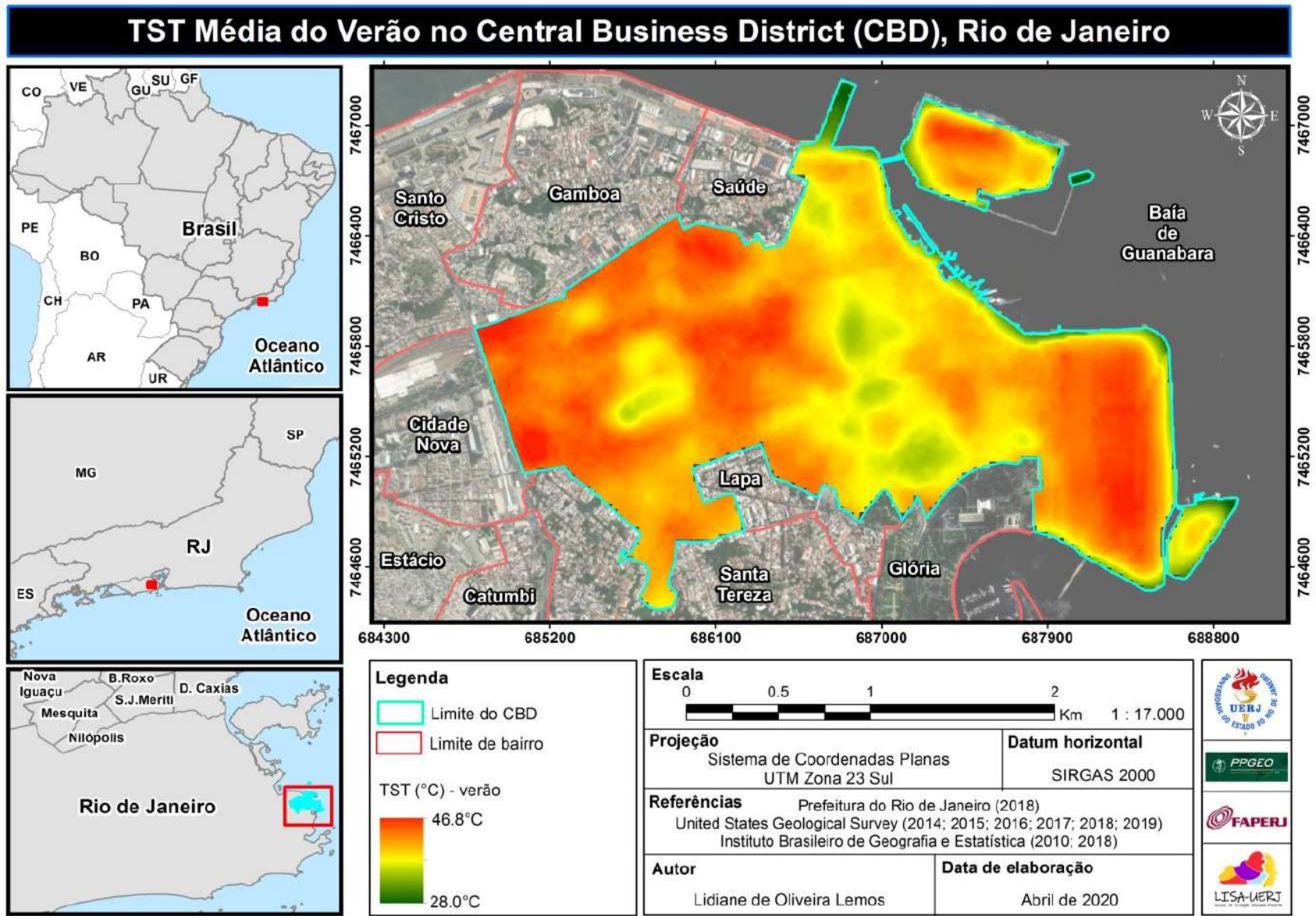
Neste capítulo, apresentam-se os principais resultados e discussões dos procedimentos desenvolvidos na metodologia. Inicialmente, foi analisado, a partir da termografia de superfície, o campo térmico em situação sazonal de verão e inverno do *Central Business District* do Rio de Janeiro, partindo de dados orbitais matutinos do LANDSAT-8. Em seguida, foram examinadas as camadas que formaram o Mapa de Análise Climática e o próprio UC-AnMap, segundo seu potencial de aquecimento e resfriamento (suscetibilidade climática). A partir da análise e confrontação da TST e do UC-AnMap, os pontos selecionados para as medições durante o experimento de campo, bem como, as contradições inerentes ao canyon da Avenida Rio Branco foram reconhecidos e são apresentados.

Encerrando os resultados e discussões, o capítulo traz a análise dos dados levantados em cada ponto amostral selecionado durante os experimentos de campo. Isto é, a análise rítmica da estação meteorológica de cada dia de experimento e a análise da mobilidade têmporo-espacial horizontal e vertical do canyon urbano. Possibilitando, assim, analisar a influência da morfologia urbana no desempenho térmico, na estrutura tridimensional da atmosfera do CBD. Ressalta-se, que essas análises foram contextualizadas segundo diferentes processos atmosféricos: campo térmico sob a situação de estabilidade, campo térmico sob situação de instabilidade e campo térmico pós-situação de instabilidade.

4.1 Termografia da superfície terrestre

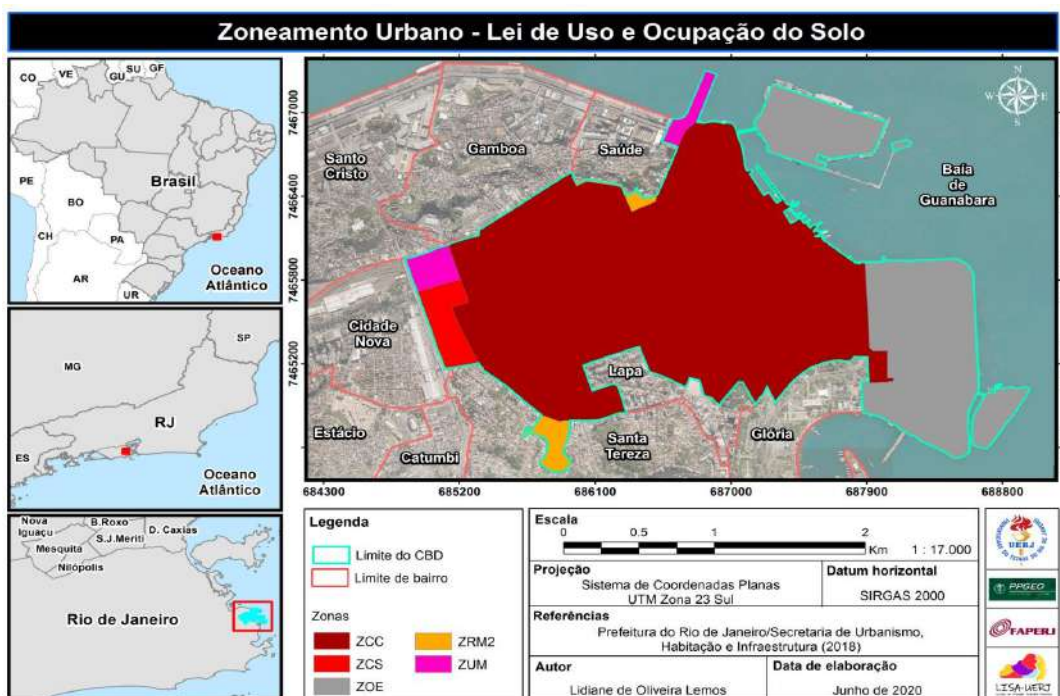
A análise da média da termografia de superfície terrestre para as manhãs dos verões de 2014 a 2019 indica a predominância das faixas de temperatura superficiais mais altas ($> 38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), sendo que apenas uma pequena área do território do CBD apresenta as faixas menores de temperatura (entre 28°C a $38,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esses resultados apontam que o comportamento do campo térmico, em geral, apresentou média de TST relativamente elevada (Figura 15 e 16).

Figura 15 - TST média do verão no CBD do Rio de Janeiro.



Por meio do uso das imagens LANDSAT-8 e da Lei de Zoneamento e Ocupação do Solo de 2018 (Figura 17), foi possível observar que o Campo do Santana¹⁸, “ilha verde” inserida na ZCC, esteve associado às faixas de temperaturas entre 34,9°C e 38,9°C. Enquanto nas zonas de concentração de comércios e serviços (Zona Consolidada Central (ZCC) e Zona Comercial e de Serviços (ZCS), Zona de Operações Especiais (ZOE) e Zona Residencial Multifamiliar 2 (ZRM-2), as TST registradas variaram, predominantemente, entre 38,9°C e 46,8°C. As diferenças encontram-se associadas ao potencial de atenuação da vegetação sobre a carga térmica, à cobertura do solo por edificação e à rugosidade. Por exemplo, a ZCS e ZRM-2 apresentam 10% de superfície livre mínima, ou seja, área do terreno que deve ser mantida livre de construção em qualquer nível, preferencialmente com a cobertura vegetal existente. Para a ZCC esse percentual é isento. Ademais, o afastamento frontal das construções na ZCS é de 3 metros, na ZRM-2 é de 3 a 5 metros e da ZCC é isento, o que dificulta a circulação do ar e dispersão do calor (LEI DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, 2018).

Figura 17 - Zoneamento urbano no CBD do Rio de Janeiro.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2018). Elaborado pela autora (2020).

¹⁸ Não foi possível utilizar o Campo de Santana, ao invés do aeroporto, como ponto de controle pelo: funcionamento limitado durante o final de semana e pela densidade da cobertura arbórea que gera sombreamento.

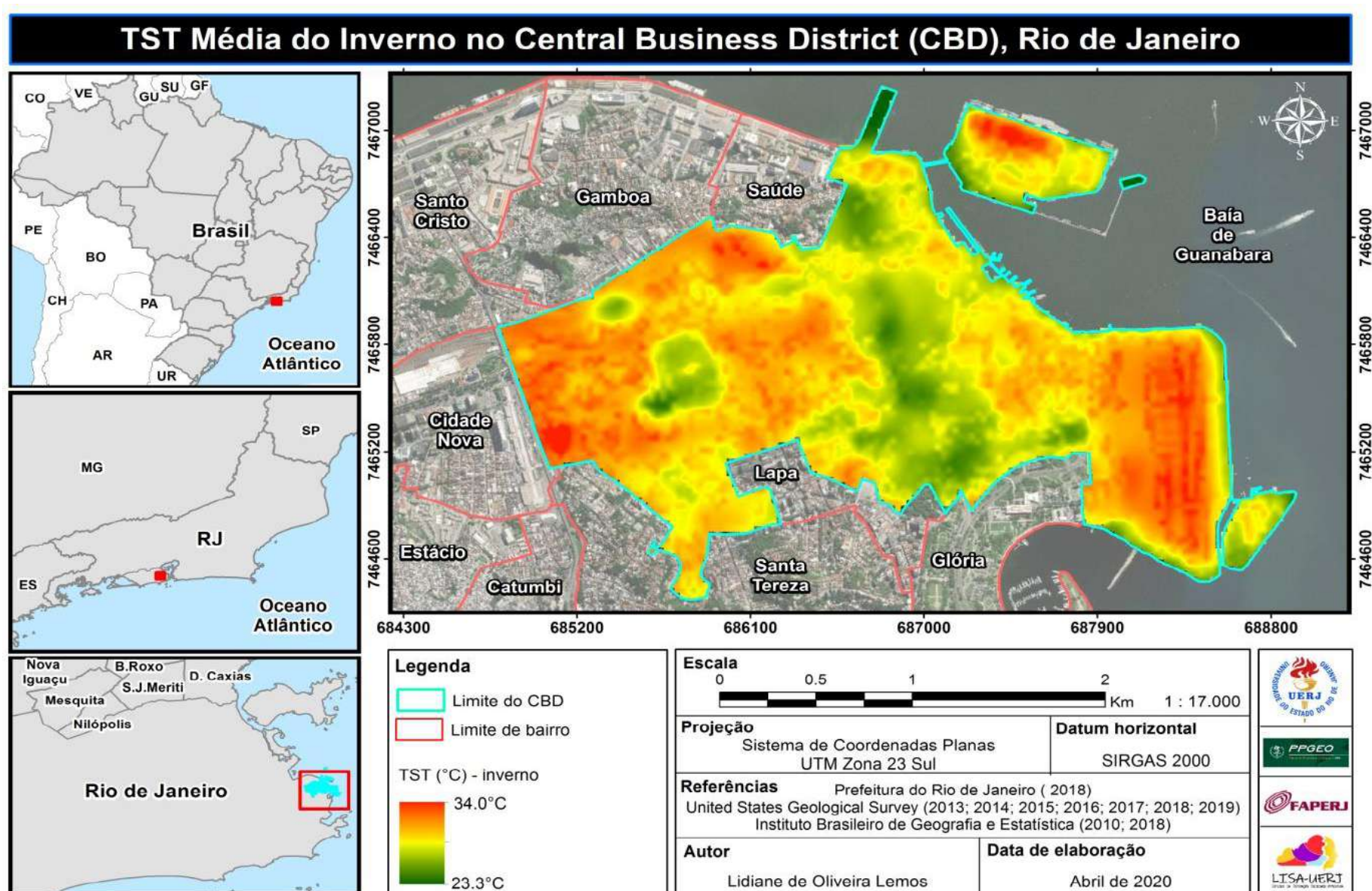
No que se refere a ZOE, no Aeroporto Santos Dumont¹⁹, a retirada da vegetação para a construção de pistas de decolagem pavimentadas é a responsável pelas TST elevadas. Já a ZUM apresenta dois comportamentos: a ZUM próxima a ZCS manifesta o campo térmico semelhante à zona supracitada por possuir os mesmos padrões de ocupação determinados na Lei de Zoneamento e Ocupação do Solo de 2018; por outro lado, a ZUM inserida na região portuária (Praça Mauá), segundo a Lei Complementar 101/2009, e sob a influência da brisa marítima da baía de Guanabara, por contar com poucas edificações esparçadas (Museu do Amanhã, Serviço de Assistência Social da Marinha, Odontoclínica da Marinha), apresenta as menores faixas de temperaturas de superfície (28°C a 34,9°C).

Cabe ressaltar um destaque em relação à ZCC, precisamente as áreas verticalizadas (*canyons* urbanos) da Avenida Rio Branco, cujas temperaturas superficiais apresentaram similaridades térmicas ao Campo do Santana (34,9°C e 38,9°C). Em fato, áreas com alto nível de verticalização e proximidade entre prédios, ao projetarem sombras uns sobre os outros, tendem a criar nichos de temperaturas de superfícies mais amenas (PRIMAVESI et al., 2007) (Figura 16).

No que diz respeito às formas e coberturas urbanas de altas e baixas temperaturas, elas não apresentaram grandes variações entre os meses de verão e inverno. Isto é, ambos os períodos sazonais mantiveram a mesma variabilidade espacial do campo térmico. A cobertura vegetal do Campo do Santana, os paredões de edificações da Avenida Rio Branco (Figura 19) e o ZUM da região portuária (Praça Mauá) continuaram a apresentar as faixas de temperaturas mais amenas (23,3°C a 28,7°C). Por outro lado, as feições de maiores temperaturas também continuam sendo as áreas de comércios e serviços, ZRM-2 e ZOE (sobretudo, o Aeroporto Santos Dumont), predominando, respectivamente, os seguintes os valores de TSTs: 28,7°C a 34°C, 28,7°C a 31,6°C e 28,7°C a 34°C.

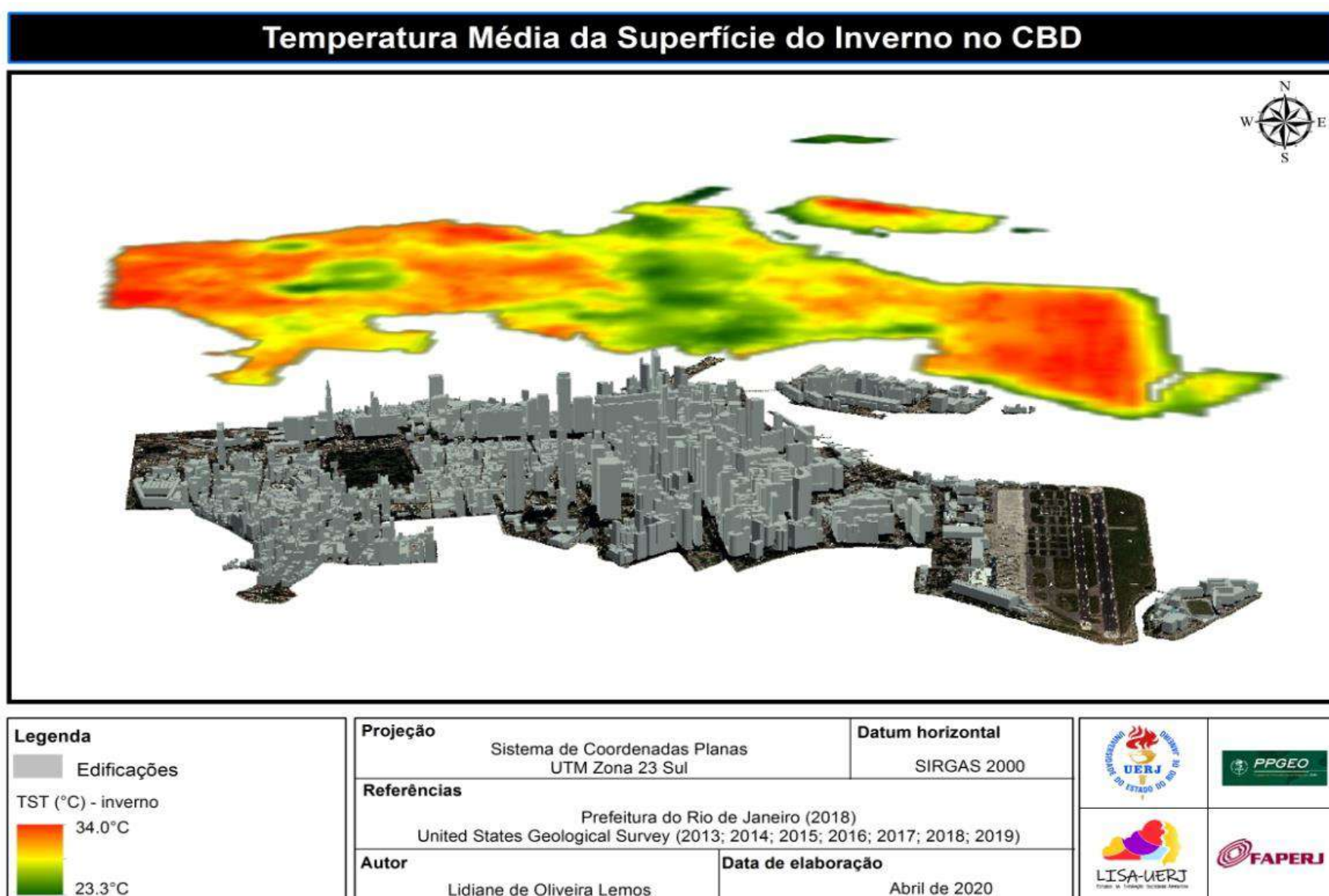
¹⁹ Cabe reforçar que a estação meteorológica de referência foi instalada em campo aberto e com cobertura da terra por gramínea, representada tanto no verão quanto inverno por áreas marginais do aeroporto com menor temperatura de superfície.

Figura 18 - TST média do inverno no CBD do Rio de Janeiro.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); USGS (2013 a 2019); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Figura 19 - Temperatura média da superfície do inverno no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); USGS (2013 a 2019); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

4.2 Caracterização da suscetibilidade climática urbana

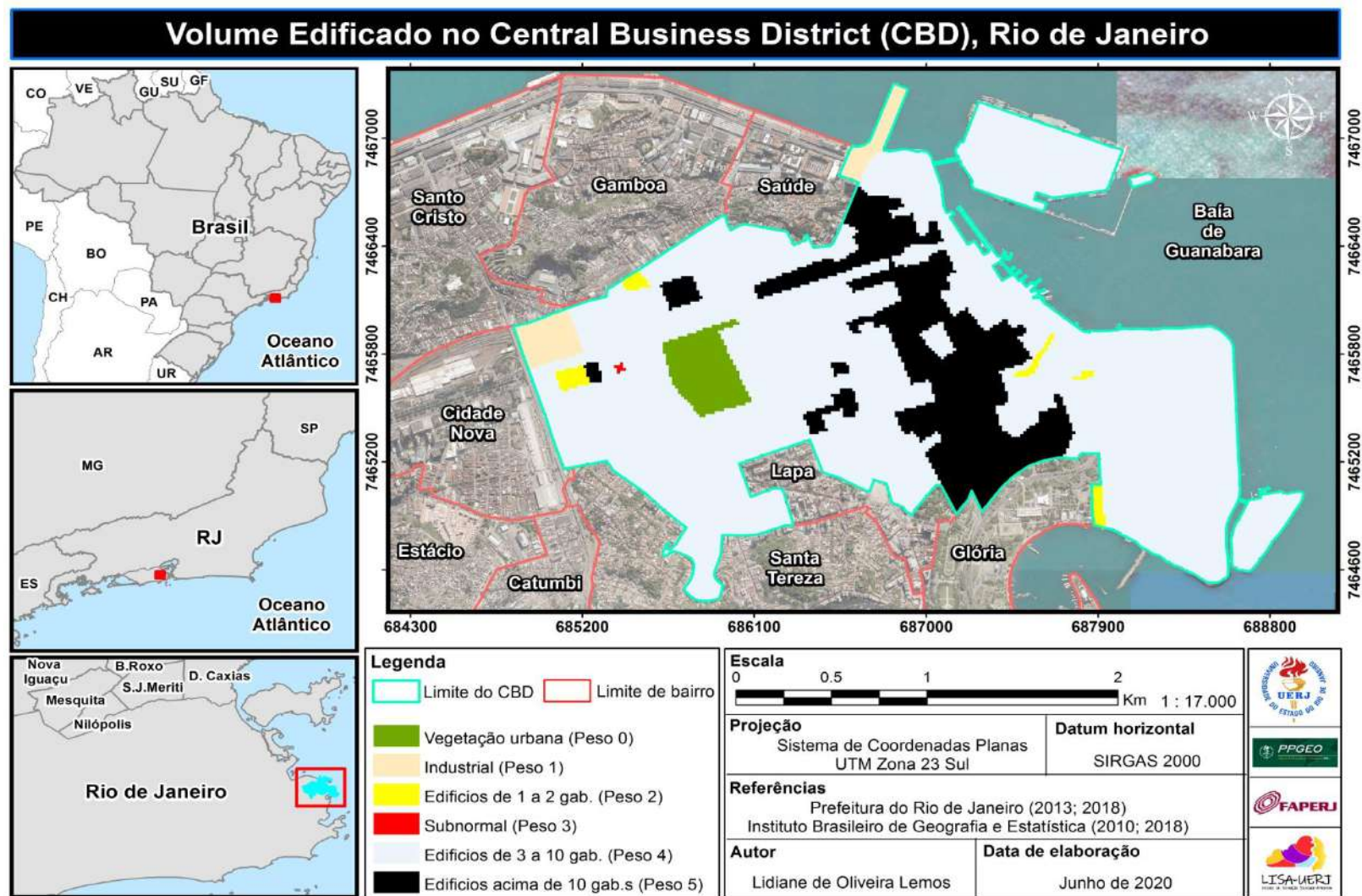
Camada 1: volume edificado

A geometria urbana possui uma complexa influência na estrutura horizontal e vertical do microclima urbano: quanto maior o volume de edificação maior a capacidade de armazenamento de calor, e consequentemente, a probabilidade de geração da ilha de calor noturna. Em cidades onde as temperaturas e umidades são elevadas, como o Rio de Janeiro, as influências desses ambientes densamente construídos constituem-se de forma negativa, uma vez que a produção artificial de calor aumenta, gerando condições de desconforto térmico. Um aliado para dispersar o efeito desta carga térmica seriam os ventos, não obstante a maior concentração de edifícios com pouco espaços são entraves à circulação local do movimento horizontal do ar.

O *Central Business District* do Rio de Janeiro encontra-se densamente ocupado, apresentando formas urbanas diversas e pouco espaçadas. É possível identificar que seu uso predominante encontra-se associado às atividades de comércio e prestações de serviços, onde se destaca a presença de edificações intermediárias, entre três a dez pavimentos. Alguns remanescentes de edifícios de até dois pavimentos também ocupam o ZCS e a ZCC. Ainda em relação à ZCC, a Avenida Rio Branco, um dos lografouros de fluxo intenso, prevalece ao longo de toda sua trajetória com verticalização acima de 10 pavimentos, com ativo uso comercial e de serviço (Figura 20).

Há também verticalização intermediária na Zona de Ocupações Especiais, Zona Residencial Multifamiliar 2 e presença pontual da favela, habitação precária com problemas de suporte básico, que acabam gerando condições de ocupações adensadas e com materiais que contribuem para o aquecimento da atmosfera urbana. Por fim, feições e uso industrial ocorrem nas zonas localizadas nos extremos superiores do CBD, conhecida como Zona de Uso Misto.

Figura 20 - Mapa de volume edificado no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2013; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

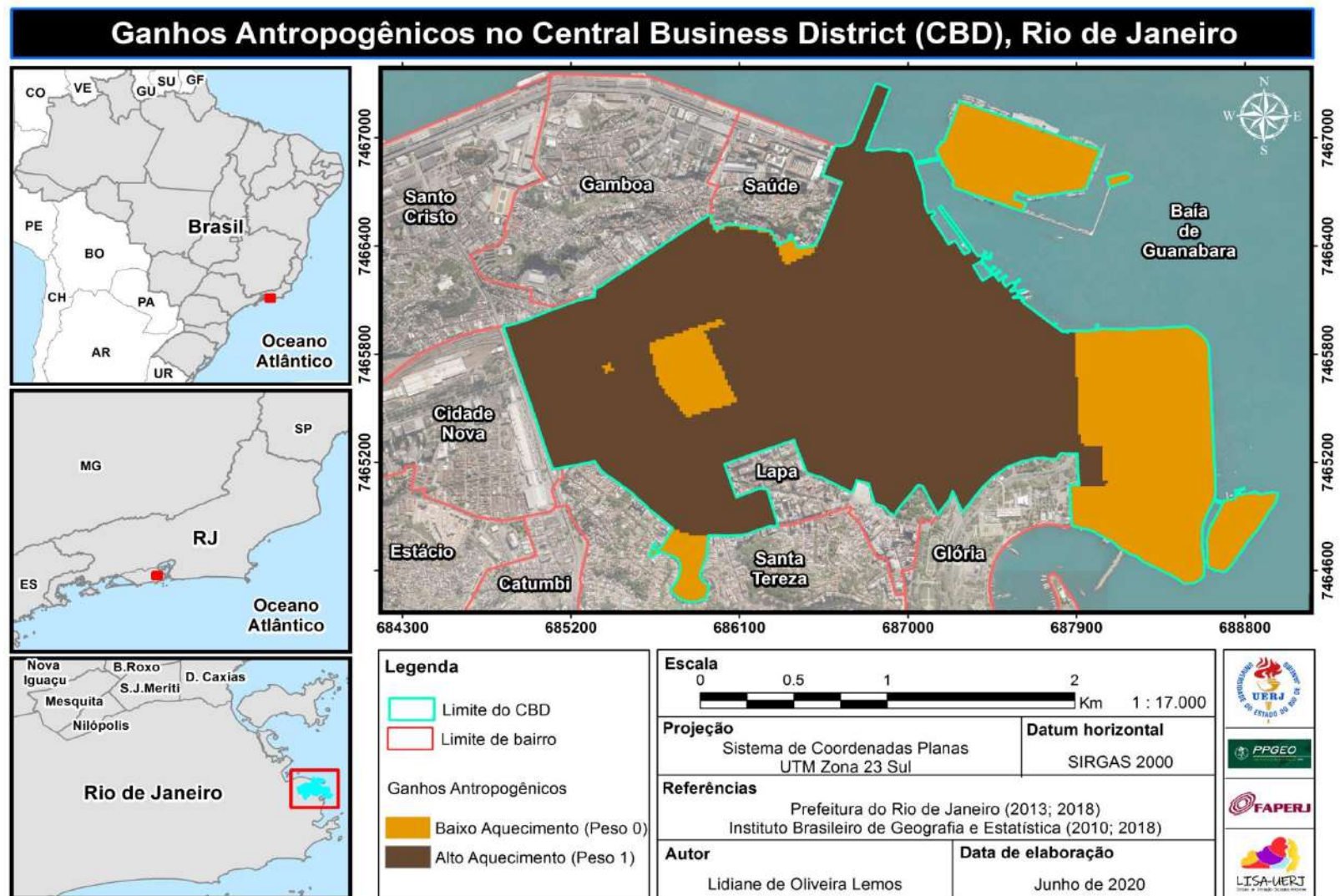
Camada 2: uso do solo relativo a ganhos antropogênicos

Há uma relação estreita entre as atividades desenvolvidas no espaço urbano e as consequências destas para o clima. De fato, determinadas atividades demandam maiores consumos de eletricidade e gás em virtude do uso predominante. Neste sentido, foram definidas duas categorias principais com base nas classes de uso do solo existentes no CBD, relacionadas aos ganhos antropogênicos: baixo e alto potencial de aquecimento (Figura 21).

As classes favela, vegetação urbana (Campo do Santana), Zona de Operações Especiais e Zona Residencial Multifamiliar-2 demandam baixo consumo de eletricidade e gás, havendo baixo potencial de aquecimento. Enquanto, a Zona Comercial e de Serviços, Zona Consolidada Central e Zona de Uso Misto constituem espaços de alto potencial de aquecimento. Observa-se que praticamente toda a área do *Central Business District* apresenta esta última categoria, no que se refere aos ganhos antrópicos.

Importante ressaltar que os espaços que permitem uso industrial, apesar de não possuírem grandes extensões de áreas construídas, realizam atividades que demandam consumo de energia e geram situação de alto potencial de aquecimento. Da mesma forma, as zonas de comércio e serviços necessitam de elevada energia para suprir seu funcionamento e, compreendendo, que as zonas verticalizadas (acima de 10 gabaritos) coincidem com um dos logradouros de mais intenso uso comercial e de serviço (Avenida Rio Branco) sabe-se que o elevado calor interno das edificações retroalimenta a energia aprisionada nestes *canyons* urbanos.

Figura 21 - Mapa de ganhos antropogênicos no CBD.



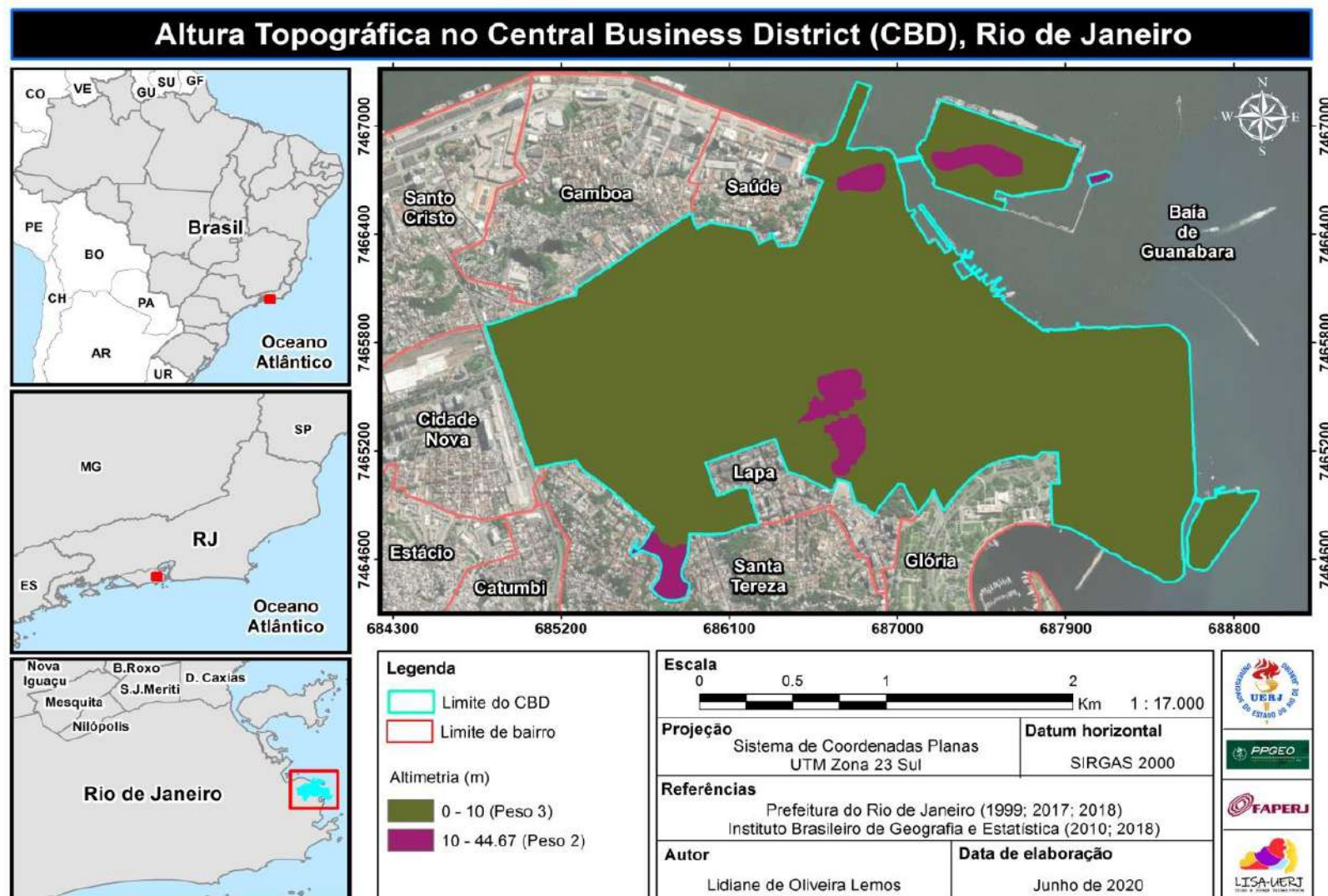
Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2013; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Camada 3: altura topográfica

O efeito da ilha de calor urbana é maior nos valores mais baixos de altura topográfica, tendo em vista que a cada decréscimo de 100 metros, o movimento do ar é reduzido, gerando aumento de 1° Celsius. Contribui para tal, o aumento da rugosidade.

Com intuito de verificar a influência da altimetria sobre a configuração da ilha de calor urbana no *Central Business District* foi elaborado o mapa de altura topográfica (Figura 22). Percebe-se que, o CBD possui relevo relativamente plano, sem grandes oscilações topográficas, em virtude do processo geohistórico de produção de seu espaço urbano. Sua altimetria máxima é de 44,67 metros, estando a maior parte na cota de 0 a 10 metros de altitude, considerada a mais influente sobre a ilha de calor.

Figura 22 - Mapa de altura topográfica no CBD.



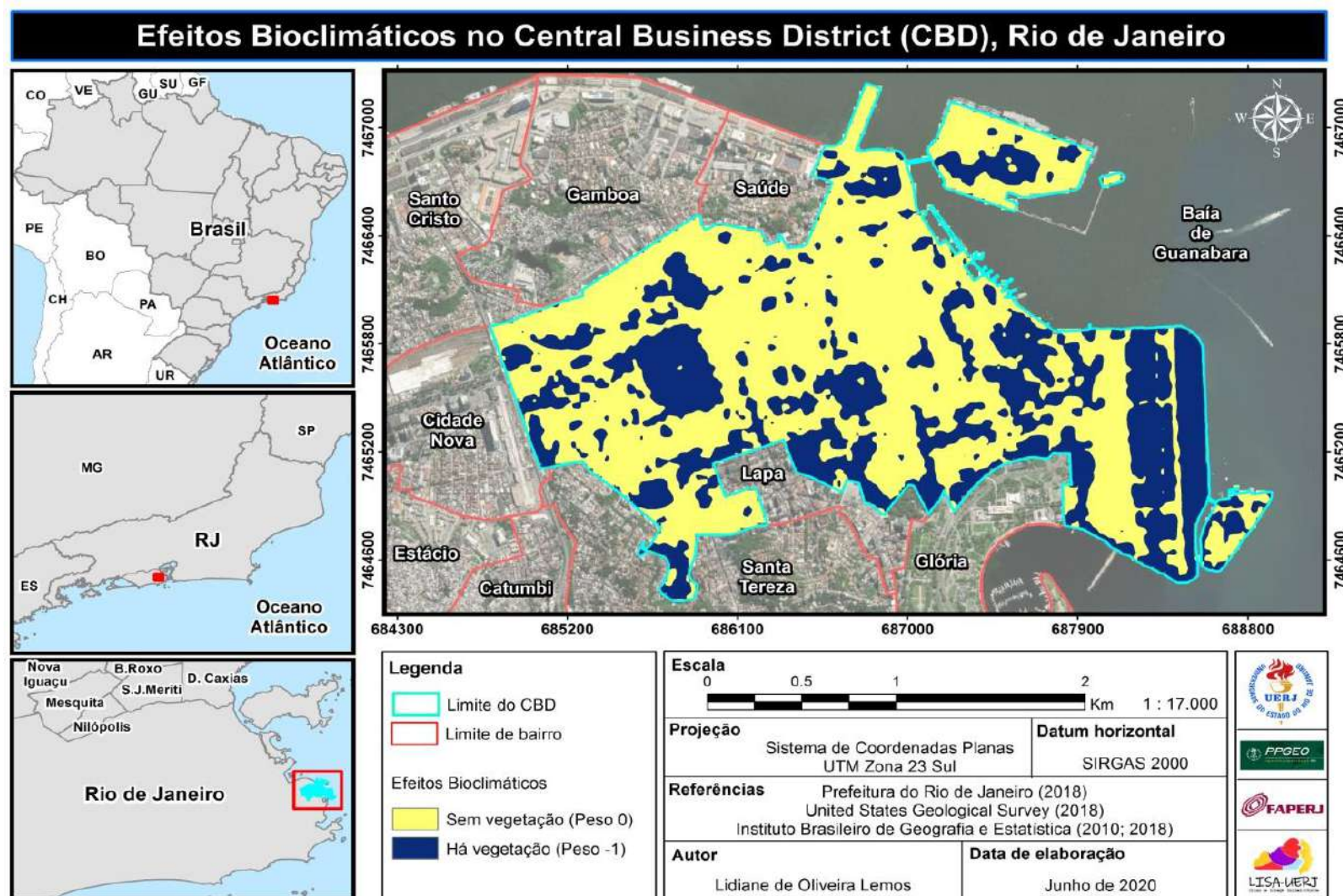
Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (1999; 2017; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Camada 4: áreas verdes urbanas (efeito bioclimático)

As áreas verdes urbanas são relevantes por atuarem como moderadores climáticos, atenuando o aquecimento do ar e minimizando a carga térmica. O microclima gerado a partir de seu sombreamento e de suas trocas térmicas úmidas (calor latente) influencia na amenização da configuração da ilha de calor urbana. Por isso, do ponto de vista climático urbano, a biomassa foliar dos espaços verdes apresenta efeitos bioclimáticos positivos.

Ao analisar a distribuição espacial destas áreas no *Central Business District* (Figura 23), nota-se que há uma concentração de vegetação arbórea que se destaca em meio a Zona Consolidada Central. Esta concentração refere-se ao parque Campo do Santana, denotado como um espaço de lazer. Observam-se também algumas árvores distribuídas, sobretudo, em pequenas praças e logradouros. No mais, a macha que marca presença da vegetação na Zona de Operações Especiais, especificamente no Aeroporto Santos Dumont, diz respeito às gramíneas entorno das pistas de pouso e decolagem e algumas vegetações do tipo arbustiva.

Figura 23 - Mapa de efeitos bioclimáticos no CBD.



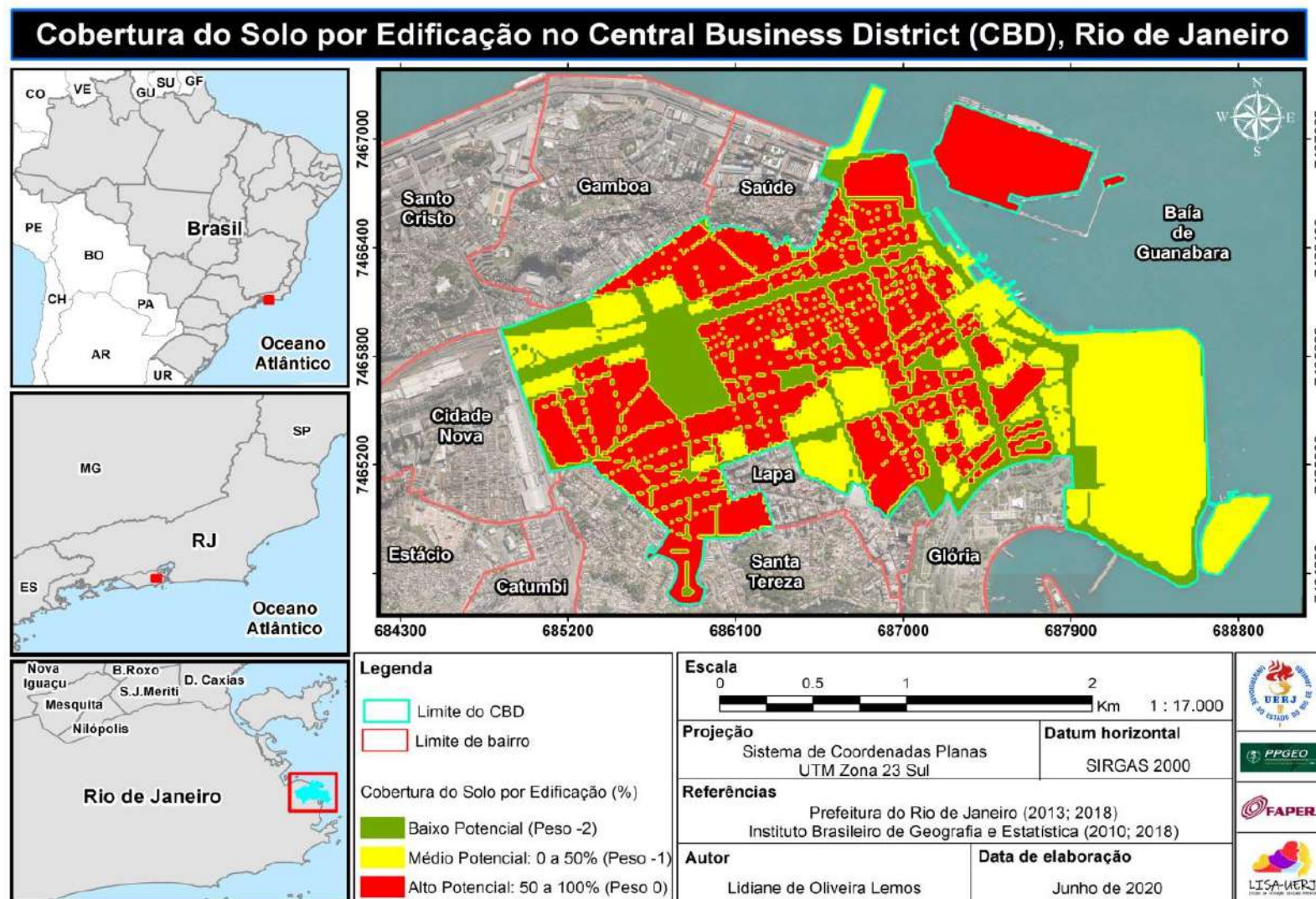
Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); USGS (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Camada 5: cobertura do solo por edificação

O mapa de cobertura do solo por edificação trata da porcentagem das quadras, que são ocupadas por edifícios, independente do número de pavimentos. Analisando a Figura 24, percebe-se que, predomina na área de estudo densa cobertura do solo por edificações, isto é, as quadras apresentam entre 50 a 100% de cobertura por edifícios. Isto gera uma condição de adensamento capaz de interferir diretamente no clima urbano do *Central Business District*, tendo em vista os poucos espaços abertos presentes. Verifica-se que o alto potencial manifesta-se na Zona Consolidada Central, Zona Comercial e de Serviços e Zona Residencial Multifamiliar 2.

São pontuais as quadras que estão associadas ao médio potencial (0 a 50%). Observa-se que esta categoria encontra-se de certa forma contínua na porção leste do CBD, na ZOE, associada à presença do Aeroporto Santos Dumont e nas Zonas de Uso Misto. Ao mesmo tempo, também são restritas as quadras de baixo potencial (com áreas verdes e/ou pavimentadas), estando associadas aos logradouros e ao Campo do Santana.

Figura 24 - Mapa de cobertura do solo por edificação no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2013; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

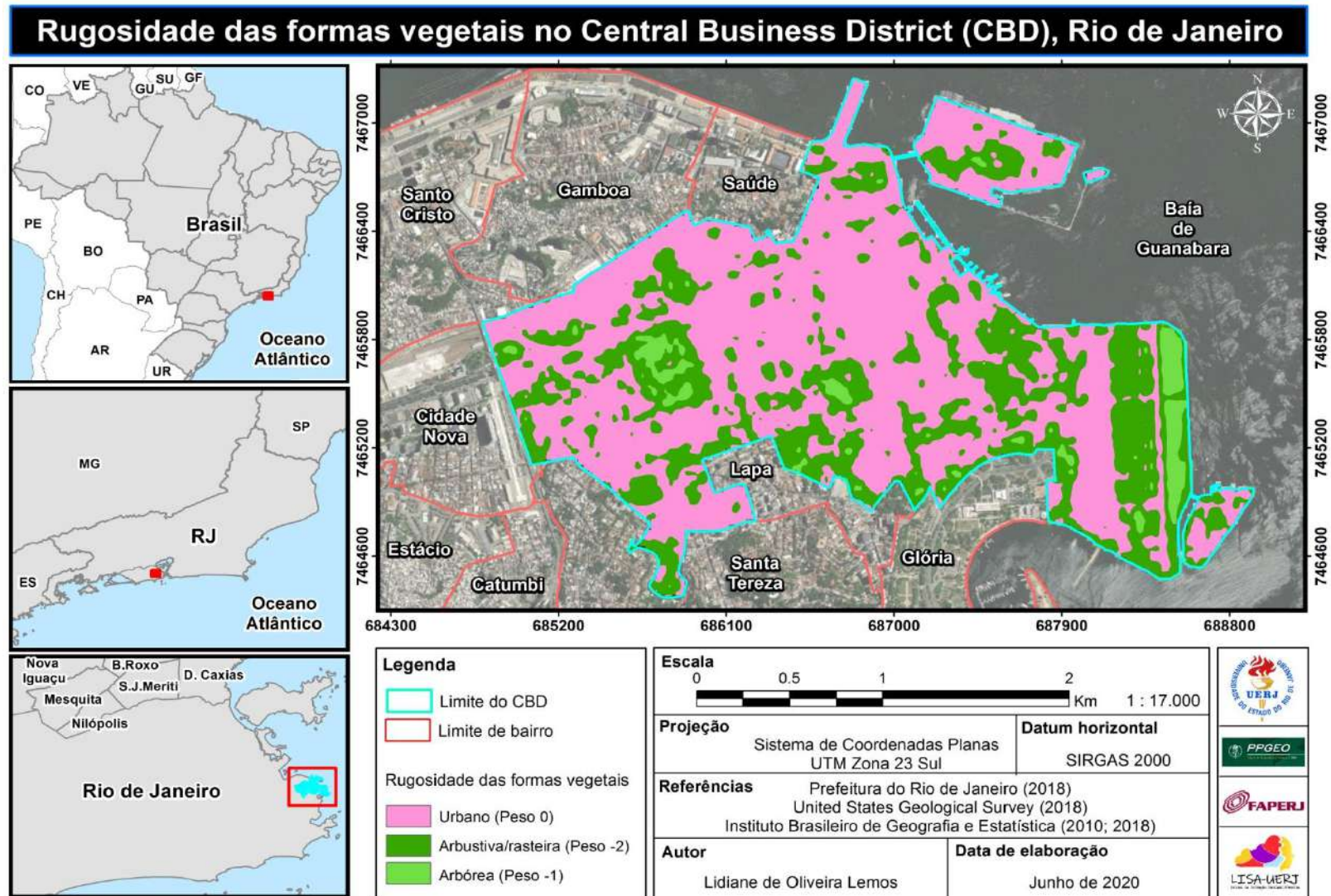
Camada 6: rugosidade das formas vegetais

As distintas rugosidades das formas vegetais impactam diferentemente a capacidade de movimentação do ar e, conseqüentemente, o potencial dinâmico. Para este mapa reconheceu-se duas categorias de vegetação: arbustiva/rasteira e arbóreo (Figura 25).

Por ser de pequeno porte, a vegetação arbustiva/rasteira apresenta menor rugosidade e maior potencial dinâmico, isto é, elevada capacidade de arrefecimento, corroborando para reduzir os efeitos da ilha de calor urbana. Esta categoria, ainda que fragmentada, predominou no espaço do CBD em meio ao urbano.

Já a presença de vegetação arbórea encontra-se restrita de norte a sul, na porção leste do Aeroporto Santos Dumont e no parque urbano do Campo do Santana. Devido sua maior rugosidade, o potencial dinâmico desta vegetação é menor se comparado à arbustiva/rasteira.

Figura 25 - Mapa de rugosidade das formas vegetais no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); USGS (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

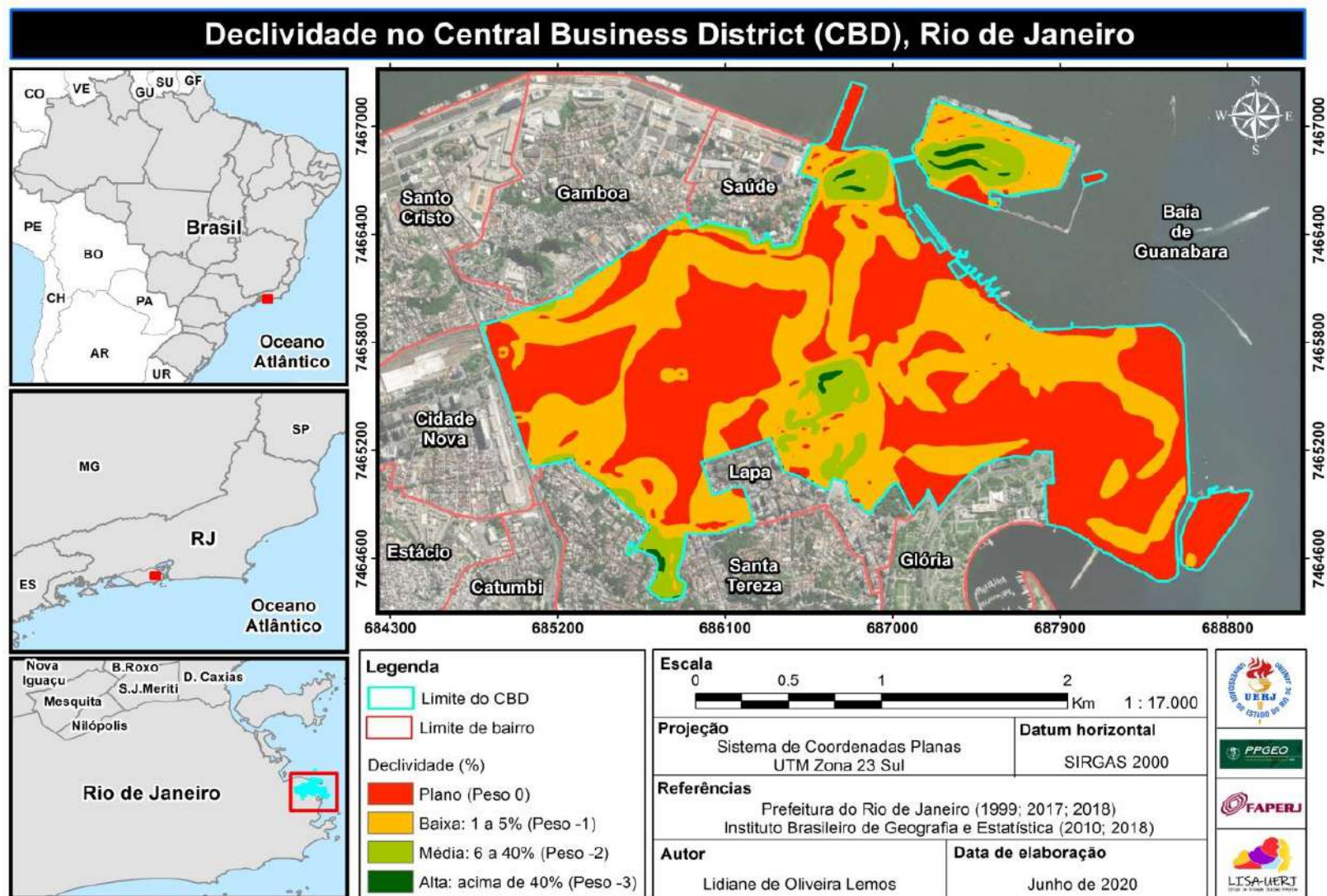
Camada 7: declividade

Apesar do *Central Business District* não possuir grandes declividades, considerou-se esta camada, uma vez que a declividade é uma influenciadora do potencial dinâmico, possuindo impacto direto sobre o movimento do ar (ventilação), sobretudo, a partir dos ventos de montanhas. Estes ventos frios aos escoarem, em descendência, pelas encostas amenizam possíveis configurações de ilhas de calor na base de vales estreitos.

O CBD apresenta um contexto geomorfológico relativamente plano, conforme indicado pelo mapa de altimetria (Figura 22). Portanto, apresenta uma distribuição da declividade, predominantemente, plana e baixa (1 a 5%). Ao analisar o mapa de declividade (Figura 26), observa-se que as classes supracitadas estão presentes na Zona Comercial e de Serviços, Zona Consolidada Central, Zona de Uso Misto e Zona Residencial Multifamiliar-2.

Nota-se que existem pontos específicos aonde a declividade chega até os 40% (áreas de média declividade) e acima de 40% (alta declividade). Esses espaços encontram-se associados à Avenida Nossa Senhora de Fátima e aos resquícios do antigo morro do São Bento, demolido durante as reformas urbanas que buscaram romper com o passado colonial no CBD.

Figura 26 - Mapa de declividade no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (1999; 2017; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

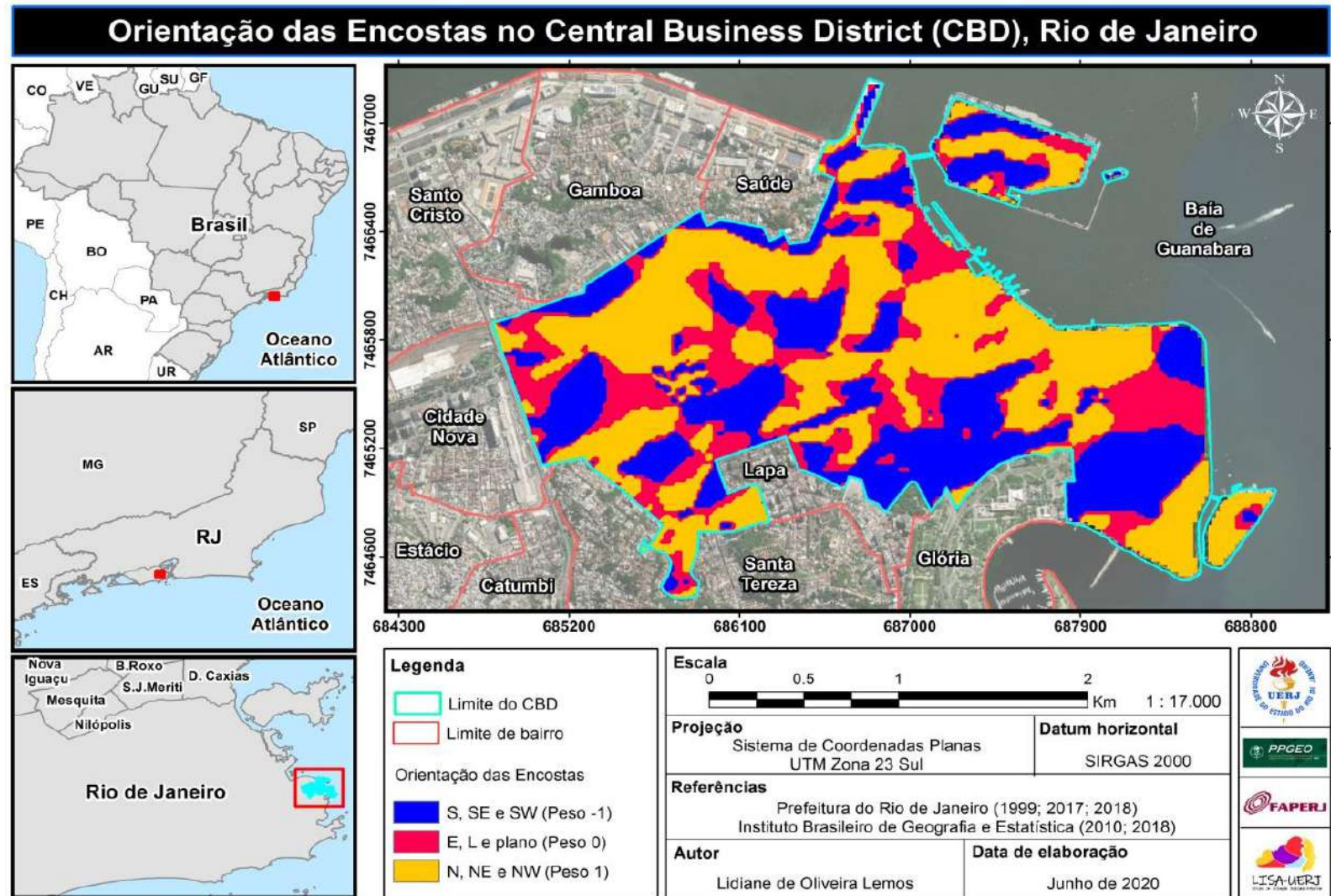
Camada 8: orientação das vertentes

Sabe-se que, dependendo da orientação, as vertentes podem contribuir para o arrefecimento dos espaços urbanos. No hemisfério Sul, as encostas de orientação sul, sudeste e sudoeste estão menos expostas à radiação solar, aquecendo-se menos. Ademais, as encostas direcionadas para as entradas de ventos no *Central Business District* possuem condições de arrefecimento de temperatura do ar e, conseqüentemente atenuam a configuração das ilhas de calor urbanas.

Sendo assim, foi construído um mapa de orientação de vertentes (Figura 27), reconhecendo-se três classes, segundo seus efeitos sobre o potencial dinâmico do clima urbano. A saber: 1) sul, sudeste e sudoeste (resfriamento); 2) leste, oeste e plano (indiferente); 3) norte, nordeste e noroeste (aquecimento).

Observa-se em todo o espaço do CBD, sobretudo, orientações pertencentes às classes leste, oeste e plana e norte, nordeste e noroeste, às quais encontramos de forma segmentada vertentes com orientação S, SE e SW. Portanto, percebe-se que há no *Central Business District* pontos de arrefecimentos imersos em espaços praticamente contínuos de vertentes cujas orientações induzem ao aquecimento e a formação da ilha de calor.

Figura 27 - Mapa de orientação das encostas no CBD.



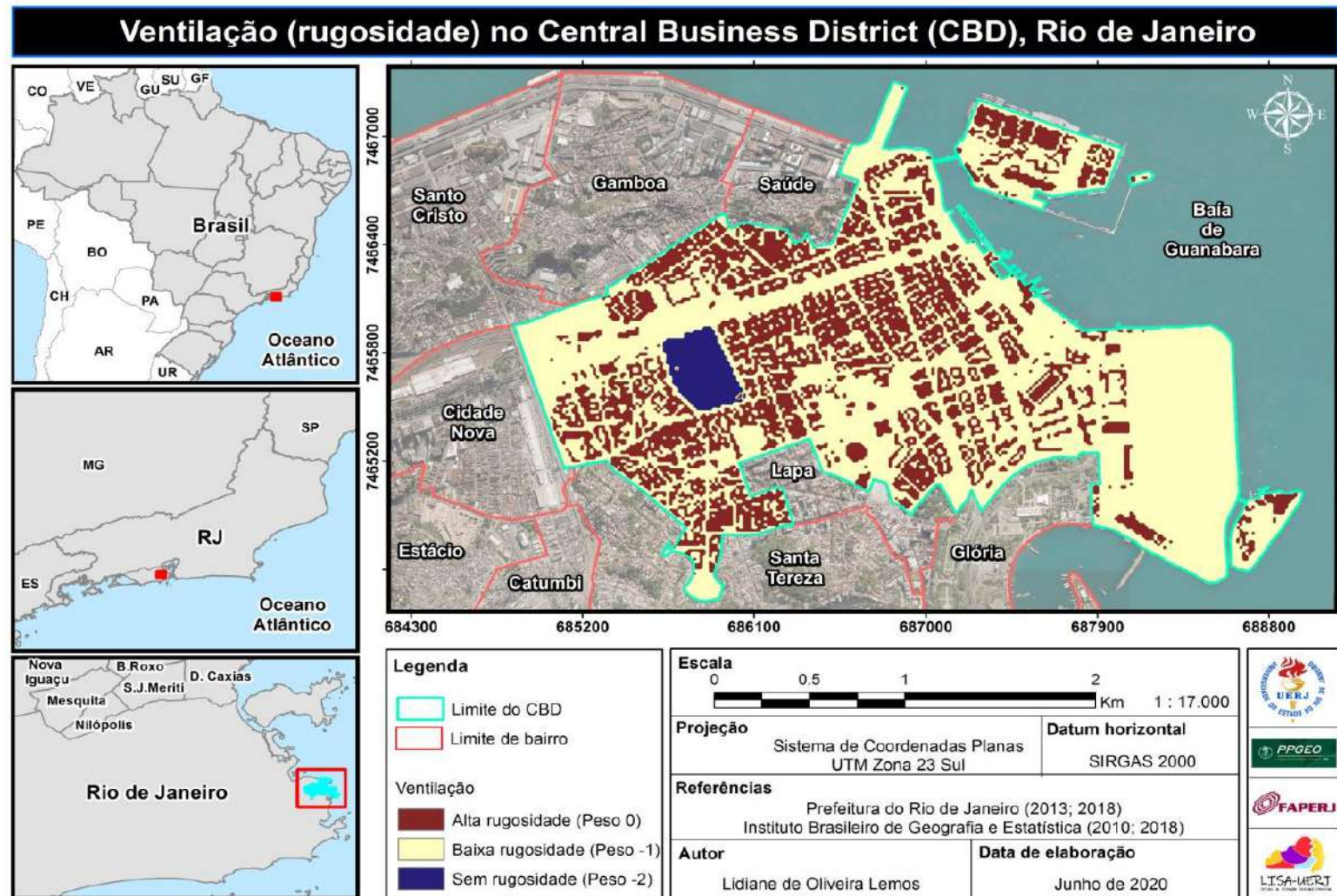
Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (1999; 2017; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Camada 9: ventilação (comprimento de rugosidade)

Partindo do entendimento que de acordo com o tipo de cobertura da terra há maior ou menor comprimento de rugosidade, o qual influencia no potencial de arrefecimento, o mapa de ventilação (Figura 28) trata da ventilação em relação ao ambiente urbano e seus diferentes comprimentos de rugosidade.

Nota-se que a maioria do espaço do *Central Business District* está inserido em um contexto de alto comprimento de rugosidade (peso 0), isto é, de entraves a ventilação urbana, tendo em vista que a maior parte do CBD está entre as zonas de comércio e de serviços de massa adensadas. Sendo assim, existe a predominância de um baixo potencial de ventilação. Poucas áreas estão inseridas nos baixos comprimentos de rugosidade (peso -1), como a Zona de Uso Misto e Zona de Operações Especiais. Há um destaque para o espaço de lazer do parque Campo do Santana, cuja presença de áreas verdes não edificadas caracteriza boa ventilação. O Campo do Santana recebeu peso -2 para o potencial de arrefecimento.

Figura 28 - Mapa de comprimento de rugosidade no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2013; 2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

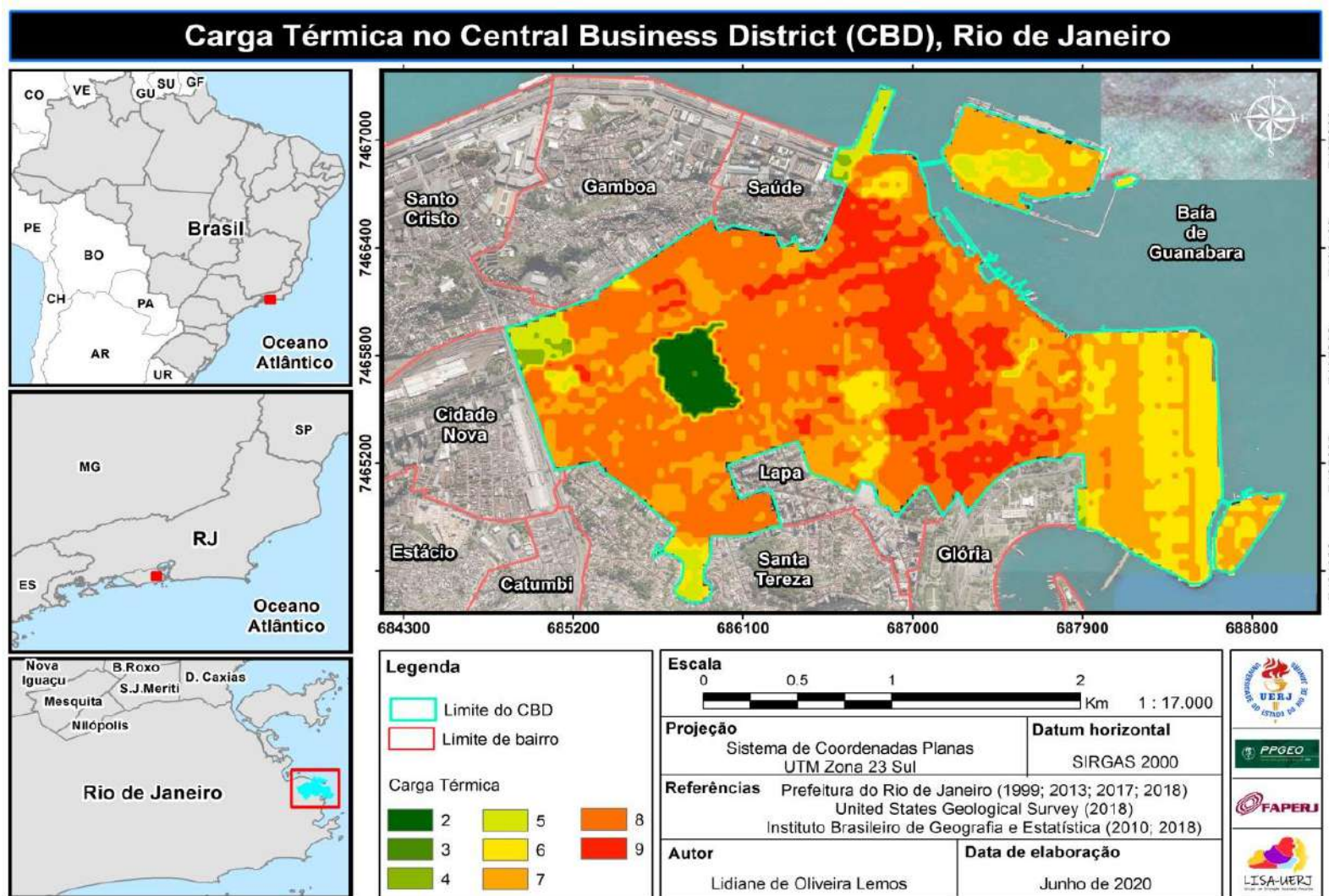
Carga Térmica

O mapa de carga térmica integrou os mapas de volume edificado (camada 1), uso do solo relativo a ganhos antropogênicos (camada 2), altura topográfica (camada 3) e efeitos bioclimáticos (camada 4). Ele determina dois efeitos, qualificando o comportamento dos aspectos da morfologia urbana frente à contribuição ao calor: negativo e positivo. O efeito negativo diz respeito à capacidade de armazenamento e emissão de calor e se expressa nas camadas de volume edificado, uso do solo relativo a ganhos antropogênicos e altura topográfica. Já o efeito positivo, representado pela camada de efeitos bioclimáticos, oferece a capacidade de mitigação do aquecimento.

No *Central Business District*, a sobreposição das quatro camadas para a elaboração do mapa de carga térmica (Figura 29) gerou 8 classes (2 a 9). As classes de 3 a 9 refletem a capacidade de elevação da temperatura do ar, por influência dos elementos analisados, pois representam valores positivos de agregação. De 3 a 6 são classes que indicam contribuição de baixo a médio para o potencial de ganho de calor, caracterizadas por padrões de ocupação menos adensados (menor rugosidade, menor cobertura do solo por edificação e menor volume edificado). Enquanto as áreas que compreendem as classes de 7 a 9 são as de maior potencial de ganho térmico, devido à morfologia urbana caracterizada pela presença de verticalização intermediária e acima de 10 pavimentos, alto potencial de cobertura do solo (50% a 100%), baixo efeito bioclimático e elevado ganhos antropogênicos. Fato esse que aumenta o potencial de aquecimento e, consequentemente, a suscetibilidade à ilha térmica.

A classe 2 representa a área que mais contribui para o arrefecimento da carga térmica no CBD, amenizando as possíveis intensidades da ilha de calor, tendo em vista suas características: baixo potencial de cobertura do solo por edificação (sem rugosidades), baixo volume edificado e baixa produção de calor antropogênico (devido ao uso destinado ao lazer e presença de vegetação arbórea).

Figura 29 - Mapa de carga térmica no CBD.



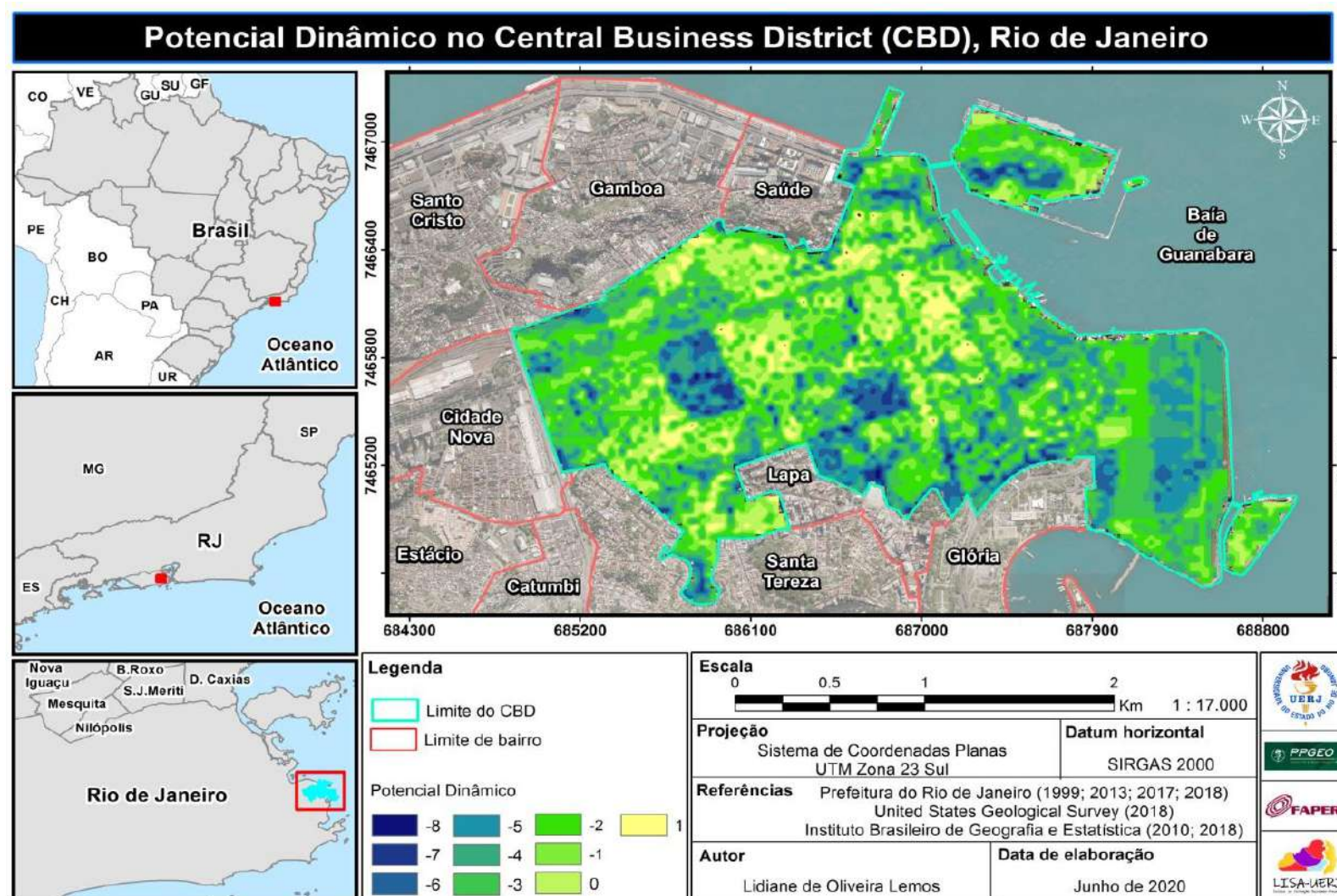
Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (1999;2013; 2017; 2018); USGS (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Potencial Dinâmico

O mapeamento do potencial dinâmico integrou os mapas de cobertura do solo por edificação (camada 5), rugosidade das formas vegetais (camada 6), declividade (camada 7), orientação das vertentes (camada 8) e de ventilação (rugosidade) (camada 9). O potencial dinâmico avalia a influência das formas urbanas sobre a velocidade do vento no ambiente urbano. Portanto, essa informação é essencial tendo em vista que os ventos desempenham papel importante na dispersão da carga térmica, sobretudo, em espaços inseridos em regiões de clima quente e úmido.

Com a sobreposição das cinco camadas para a elaboração do mapa de potencial dinâmico, o *Central Business District* apresentou 10 classes (-8 a 1) (Figura 30). A partir destas, nota-se que a maior parte do CBD apresenta baixo potencial dinâmico, devido às características da morfologia urbana que interfere nas condições de ventilação. Os espaços com menor potencial dinâmico encontram-se relacionados com os de maior rugosidade (classes 0 e 1). Já os locais de maiores potenciais estão associados às áreas vegetadas e livres de edificações, ou seja, de baixa rugosidade (classes de -4 a -8).

Figura 30 - Mapa de potencial dinâmico no CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (1999; 2013; 2017; 2018); USGS (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Mapa de Análise Climática Urbana

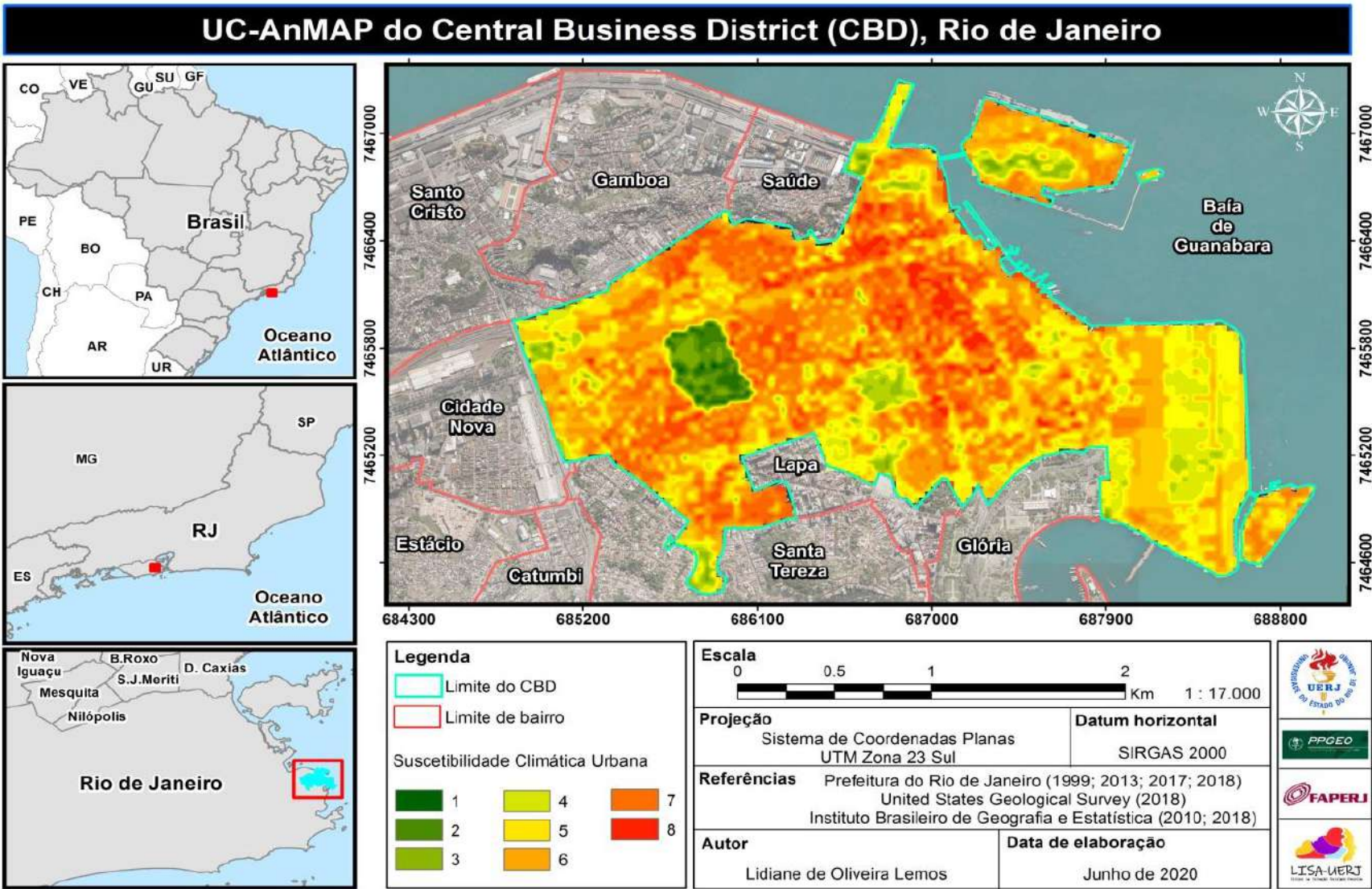
O UC-AnMap espacializou no *Central Business District* do Rio de Janeiro a suscetibilidade climática urbana (Figura 31), a partir do processamento entre os mapas de carga térmica e potencial dinâmico. Contribuindo, portanto, na determinação das condições termodinâmicas e inferência da ilha de calor.

Seu processo de criação, através da adição dos valores das oito classes de carga térmica e dez do potencial dinâmico, resultou na determinação de oito categorias (Quadro 10). Estas classes indicam a capacidade do ambiente de propagar efeitos negativos (agregação de calor) e positivos (arrefecimento do calor), segundo a influência da morfologia urbana.

As classes 1 (resfriamento do ar - bom potencial dinâmico e carga térmica moderadamente negativa) e 2 (renovação e bom circulação do ar - bom potencial dinâmico e carga térmica ligeiramente negativa) são valorosas climaticamente, uma vez que são importantes para a amenização da temperatura do ar e na circulação de ventos. Portanto, é essencial a sua proteção e preservação. As classes 3 (atividade climática baixa - baixa carga térmica e bom potencial dinâmico) e 4 (atividade climática relevante - alguma carga térmica e algum potencial dinâmico) são áreas ligeiramente suscetíveis, pois caracterizam-se por serem espaços que não afetam o aumento da temperatura do ar e cuja influência no clima é relevante, respectivamente.

Já as classes 5 (carga térmica baixa) e 6 (carga térmica relevante) constituem espaços suscetíveis. Enquanto a categoria 5 não oferece alta carga térmica, na classe 6 o conforto térmico já é prejudicado, sendo necessário fornecer vegetação e reduzir a impermeabilização do solo. Por fim, a 7 (alta carga térmica e baixo potencial dinâmico) e 8 (ilha de calor - muito alta carga térmica e baixo potencial dinâmico), do ponto de vista climático urbano, se apresentam de alta suscetibilidade uma vez que apresentam efeitos negativo e crítico, respectivamente. Isso decorre em função das características morfológicas dessas classes: rugosidade alta e/ou elevada, escassez de vegetação e de espaços abertos.

Figura 31 - Mapa de Análise Climática Urbana do CBD.



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (1999; 2013; 2017; 2018); USGS (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2020).

Quadro 10 - Categorização do UC-AnMap a partir dos efeitos da CT e PD.

Classes	Nome	Impacto no conforto térmico	Descrição	Avaliação
1	Resfriamento do ar	Moderado	Áreas vegetadas ou próximas a corpos d'água	Muito importante para a amenização climática - Alta proteção
2	Renovação e circulação do ar	Light	Matas, bosques e campos verdes	Importante na circulação dos ventos - Preserve
3	Atividade climática baixa	Neutro	Áreas poucas adensadas, muitos espaços abertos e presença de vegetação	Não afeta o aumento da temperatura do ar - Permitido alterações no adensamento
4	Atividade climática relevante	Light	Áreas adensadas por pequenas edificações residenciais, presença de espaços abertos e baixa rugosidade	Relevante influência no clima - Alterações no adensamento voltado a dinâmica dos ventos
5	Carga térmica baixa	Moderado	Casas e blocos residenciais de quatro pavimentos, poucos espaços verdes e rugosidade baixa	Sem altas cargas térmica - Fornecer vegetação
6	Carga térmica relevante	Moderadamente forte	Áreas fortemente adensadas por edificações residenciais de baixa altura - Impõe considerável rugosidade	Conforto térmico já prejudicado - Fornecer vegetação e reduzir a impermeabilização do solo

7	Carga térmica alta	Forte	Áreas adensadas com edificações, escassez de vegetação e de espaços abertos - Rugosidade elevada	Efeitos negativos - Mitigar por ações que favoreçam a ventilação e vegetação
8	Ilha de calor	Muito forte	Áreas com elevado adensamento, baixa permeabilidade do solo e pouca vegetação - Rugosidade mais alta	Efeitos críticos - Ação de saneamento sob aspectos do clima

Fonte: NG. et al, 2008; NG et al., 2009; LEMOS et al., 2018; LEMOS et al., 2021.

Analisando o mapa climático urbano do CBD, percebe-se que os mapas de carga térmica e potencial dinâmico apresentam convergências: as classes de menor carga térmica coincidem com as de maior potencial dinâmico e vice-versa. Observa-se que, no geral, o CBD é marcado pela elevada suscetibilidade (classes 7 e 8) a configuração da ilha de calor urbana, que se expressa na Zona Comercial e de Serviços (ZCS) e na Zona Consolidada Central (sobretudo, no *canyon* urbano de Avenida Rio Branco). As áreas sensíveis (classes 5 e 6) ficaram concentradas na Zona de Operações Especiais (ZOE), ou seja, no Aeroporto Santos Dumont. As Zonas de Uso Misto (ZUM) e Zona Residencial Multifamiliar-2 (ZMR-2) apresentaram de baixa a média suscetibilidade (classes 2, 3, 4 e 5). Destaca-se a importância do Campo do Santana em meio a ZCC para a amenização da temperatura. Esse espaço, além de exercer influência nas imediações, reduz a possibilidade da ilha de calor.

4.3 Seleção dos pontos amostrais

A partir da confrontação da TST e do UC-AnMap identificaram-se os pontos que subsidiaram os experimentos de campo. Conforme já mencionado, decidiu-se pela reestruturação do trabalho de campo devido ao aumento do número de casos de COVID-19 no município do Rio de Janeiro. Sendo assim, os 36 pontos de coletas que seriam distribuídos por logradouros e/ou ambientes que contemplassem diferentes níveis de suscetibilidade climática (potencial de aquecimento e arrefecimento) no *Central Business District* do Rio de Janeiro converteram-se em total de 9 pontos.

Distribuíram-se 7 pontos amostrais para as medições *in situ* (temperatura do ar, vento (direção e velocidade) e cobertura do céu) em dois transectos, ao longo da Avenida Rio Branco. A escolha por esta avenida deve-se, sobretudo, por guardar particularidade da morfologia urbana que se destaca no CBD, os *canyons* urbanos. Ademais, identificou-se nesta avenida divergência entre os resultados dos mapas de termografia de superfície e de suscetibilidade climática urbana (UC-AnMap). Enquanto, na TST a Avenida Rio Branco apresentou os menores registros de temperatura e superfície, o UC-AnMap a identificou com significativo potencial de

aquecimento (classes de 6 a 8) e, portanto, maiores possibilidades de configuração da ilha de calor.

Sendo assim, a Avenida Rio Branco foi cortada pelo transecto 1 (sul-norte) e transecto 2 (norte-sul), com os pontos de coleta iniciando-se pelas extremidades dos dois transectos e caminhando em direção ao interior da referida avenida. O transecto 1 compreende os pontos 1 (Obelisco da Avenida Rio Branco), 2 (Fundação Biblioteca Nacional), 3 (Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha) e 4 (Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor). Já o transecto 2 é constituído pelos pontos 1 (Praça Mauá), 2 (Avenida Rio Branco/Rua Visconde de Inhaúma) e 3 (Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas) (Figuras 32 e 33) (APÊNDICE I e J).

Também para as medições horizontais foi escolhido mais 1 ambiente, o Aeroporto Santos Dumont, para a localização de estação meteorológica de controle (Figuras 34 e 35) (APÊNDICE K). Embora contida em área urbana, é o espaço que menos apresenta alterações e possui parâmetros urbanísticos diferenciados, segundo a legislação. Além disso, o aeroporto é tomado como referência pela literatura internacional para a instalação de estações meteorológicas e comparação com os registrados dos espaços urbanos.

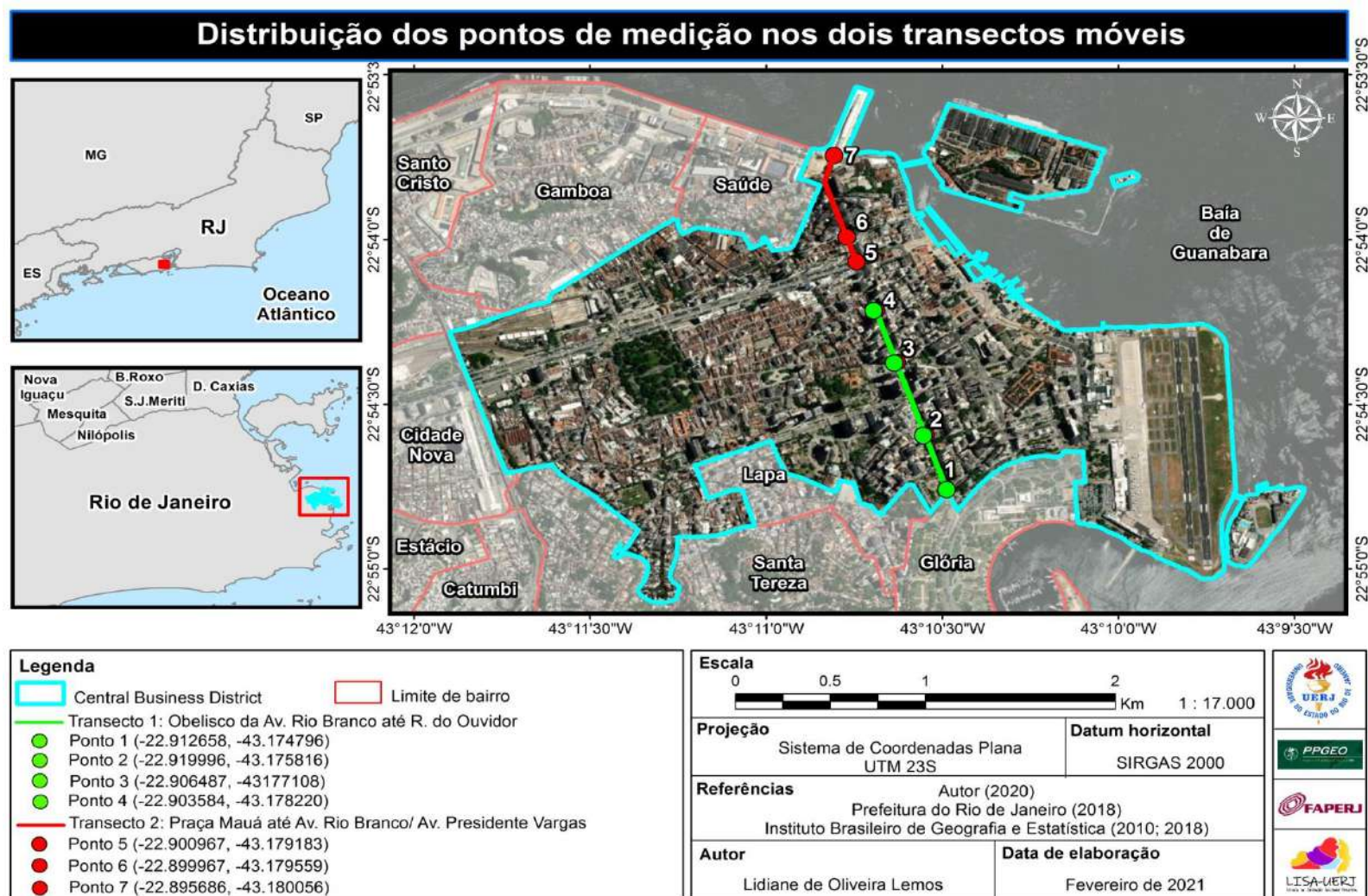
Para o voo da RPA e, conseqüentemente, a coleta de dados da estrutura vertical da *urban canopy layer* decidiu-se, inicialmente, pela Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha por este cruzamento está envolto as edificações mais elevadas, ou seja, entre 50 a 145 metros. Como já mencionado, embora as TST's mensuradas, a partir de imagens matutinas do LANDSAT-8, não tenham sido elevadas, o UC-AnMap identificou na Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha elevada suscetibilidade. Por isso, as coletas verticais com a RPA (assim como no transecto 1) tornam-se interessante; para fins de comparação e melhor compreensão do efeito dos *canyons* urbanos sobre a estrutura térmica vertical da atmosfera.

Contudo, ao tentar levantar voo com a RPA *Gkalione* x487 ultra 2020, o sinal de GPS da aeronave não conseguiu se conectar, sendo necessário o deslocamento do ponto de medição para o Largo da Carioca. O Largo da Carioca é um ponto próximo ao cruzamento dos logradouros e que guarda particularidade de influência do *canyon* urbano, com edificações que alcançam 120 metros (Figura 36 e 37) (APÊNDICE L).

Os pontos amostrais oferecem a possibilidade de análise têmporo-espacial, a partir da influência das várias possibilidades de articulações dos componentes

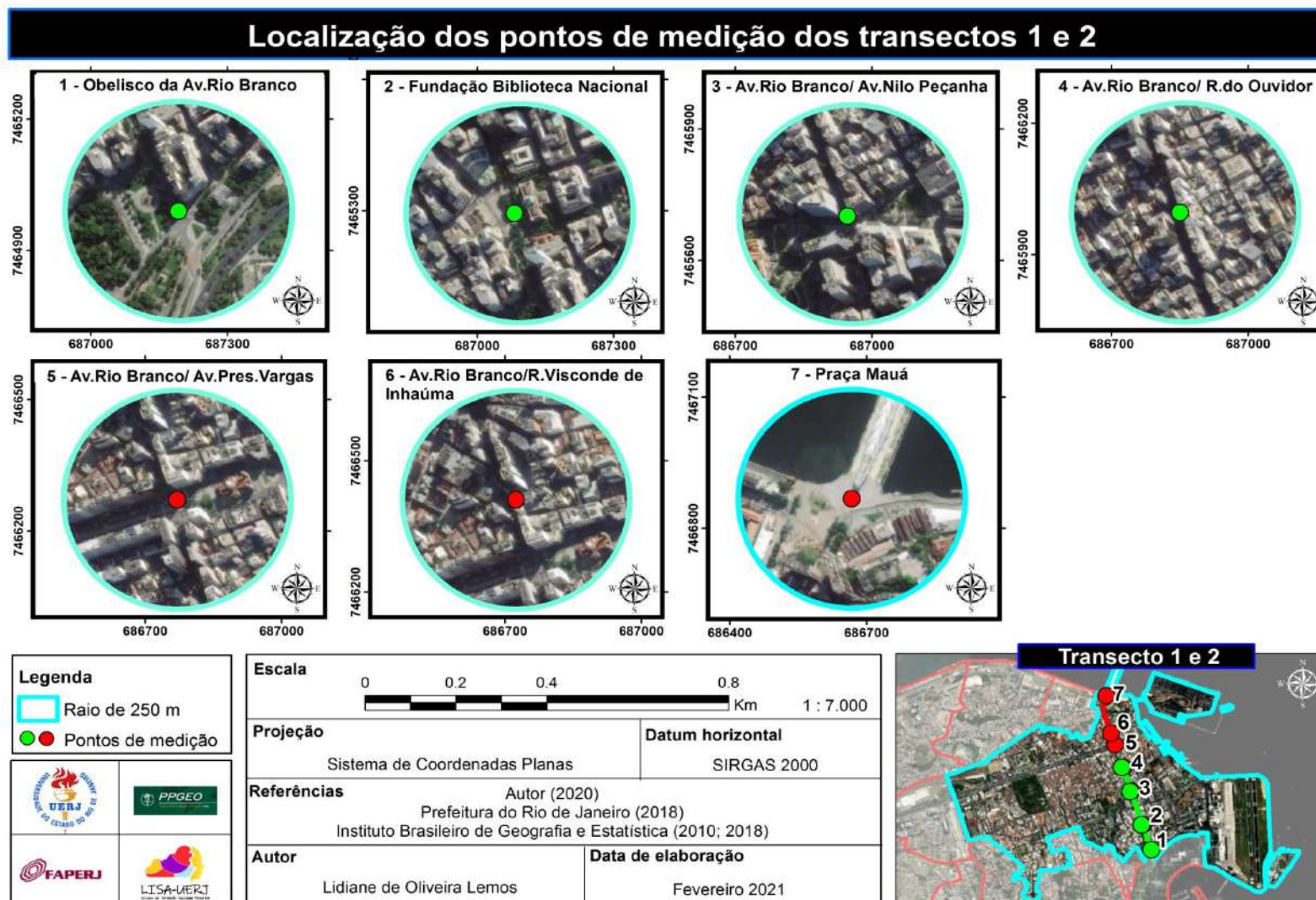
geoecológicas e urbanos do clima urbano do CBD sobre os contrastes térmicos, tanto horizontal quanto verticalmente da UCL.

Figura 32 – Distribuição dos pontos de medição dos transectos 1 e 2.



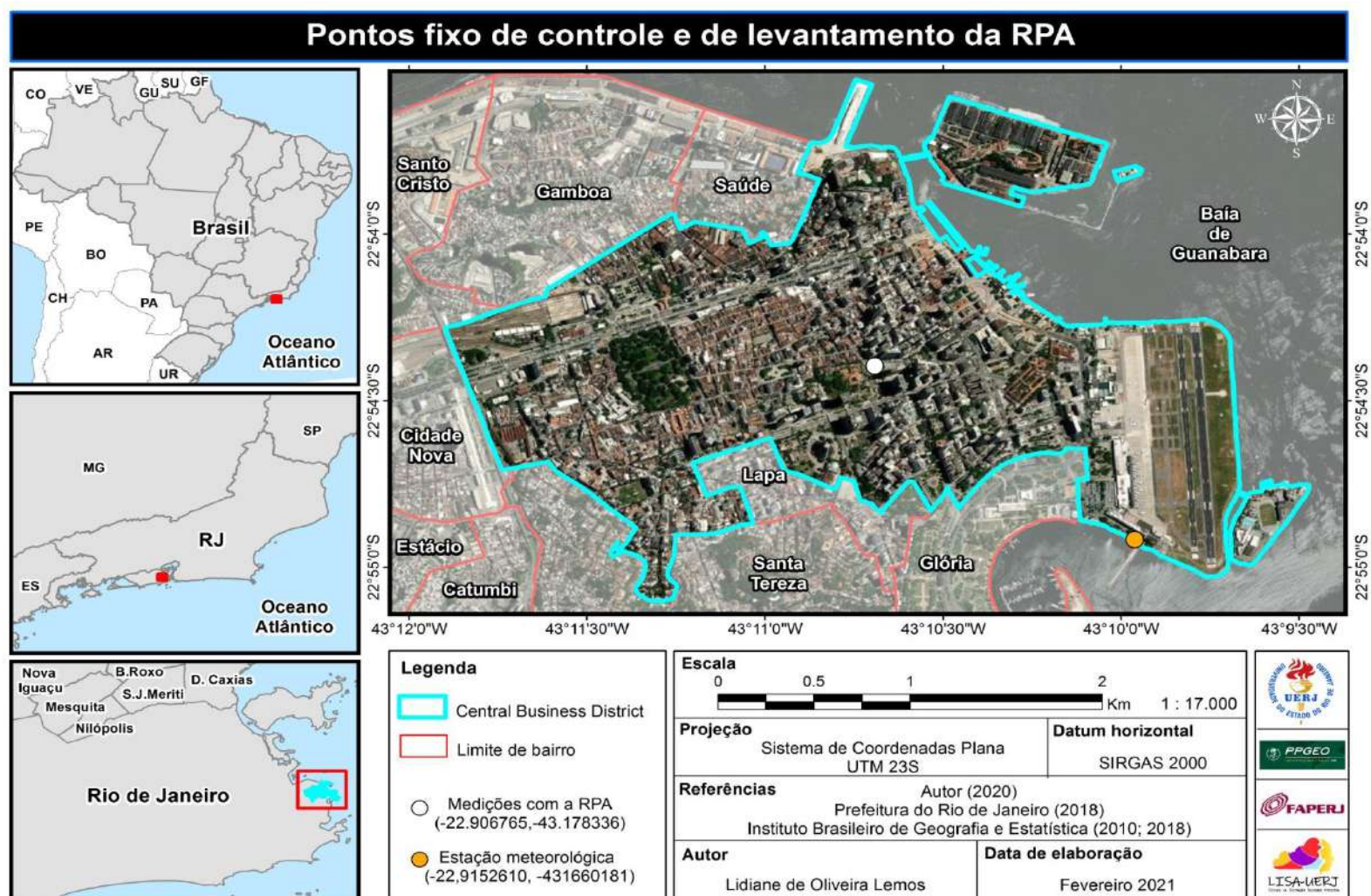
Fonte: A autora (2020); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2021).

Figura 33 – Pontos de medidas e seus entornos no raio de 250 metros.



Fonte: A autora (2020); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2021).

Figura 34 – Distribuição do ponto de medição da RPA e da estação meteorológica.



Fonte: A autora (2020); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2021).

Figura 35 – Estação de controle e ponto de levantamento da RPA e seus entornos no raio de 250 metros.



Fonte: A autora (2020); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018); IBGE (2010; 2018). Elaborado pela autora (2021).

4.4 Experimento de campo

Conforme já mencionado, os experimentos de campo por meio da seleção dos pontos amostrais abrem a possibilidade de “adentrar o espaço do *Central Business District*” para tomar-lhe o campo térmico. Possibilitando, dessa maneira, uma análise têmporo-espacial, a qual é capaz de revelar a influência da morfologia urbana sobre os contrastes térmicos horizontais e verticais da UCL.

Dessa maneira, **cada ponto está intimamente comprometido com as condições microclimáticas proporcionadas pela morfologia urbana e expressa, no momento do registrado, o comportamento da atmosfera naquele dado ponto.** Segundo Monteiro (1990), o ponto amostral encerra em si mesmo as componentes da circulação atmosférica regional, que passa a variar setorialmente e localmente nas diferentes amostras contidas naquele grande conjunto.

Sendo assim, buscando também compreender o comportamento do campo térmico das diferentes respostas pontuais às condições sinóticas determinadas pela circulação regional, os experimentos realizados foram enquadrados em situações qualitativas da atmosfera, a saber: situação sinótica de estabilidade atmosférica (24/01, 25/01, 31/01, 14/03 e 15/03), situação sinótica de instabilidade atmosférica (14/02, 22/02 e 07/03) e situação sinótica de pós-sistemas produtores de instabilidade (07/02 e 21/02).

Segundo o INPE (2013), uma atmosfera dita estável apresenta condição de resistência aos movimentos verticais (ascendentes e descendentes) do ar, que tendem a retornar à sua posição inicial. Neste caso, se o ar for forçado a subir, tenderá a espalhar-se horizontalmente e se houver formações de nuvens (*altostratus*, *nimbostratus* ou *stratus*) a partir deste processo, igualmente irão se espalhar horizontalmente em camadas relativamente finas. Por outro lado, a instabilidade resulta do favorecimento das correntes verticais do ar. Esta situação possibilita o desenvolvimento de grandes nuvens, como as do tipo *Cumulonimbus*, responsáveis por gerar fenômenos de tempestades severas.

4.4.1 Campo térmico em situação sinótica de estabilidade atmosférica

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) avançou sua atuação sobre a área de estudo, exercendo amplo domínio nos dias 24/01 (domingo), 25/01 (segunda-feira), 31/01 (domingo), 14/03 (domingo) e 15/03 (segunda-feira). Devido a sua característica de célula de alta pressão, a ASAS determinou processos atmosféricos identificados como estabilidade (ANEXO A). Os índices termodinâmicos reforçam o equilíbrio estável da atmosfera, capaz de inibir o movimento vertical do ar, condicionando o céu aberto.

Tabela 8 – Índices termodinâmicos em situação de equilíbrio estável.

Índices termodinâmicos						
00 UTC				12 UTC		
Dia	K	TT	CAPE	K	TT	CAPE
24/jan	19	36	0	13	35	0
25/jan	21	39	18	25	42	0
31/jan	Sem dados	Sem dados	Sem dados	30	45	0
14/mar	34	45	1033	30	43	531
15/mar	33	46	669	20	44	489

Fonte: UNIFEI, 2021.

Especificamente, nos dias 24/01, 14/03 e 15/03, a ausência de nebulosidade esteve associada à situação da área de estudo na isóbara 1018mb, o que indica a influência de relativa alta pressão e explica as condições de céu aberto, acompanhado de calmaria. Os dias 25/01 e 31/01 apresentaram as mesmas características de tempo, contudo com a pressão atmosférica de 1014mb. Pode-se considerar que houve uma condição sinótica de tempo bom, na qual a resposta local da estação meteorológica, de maneira geral, para os cinco dias do experimento, expressaram-se com elevação da média de temperatura do ar, redução da umidade relativa e ausência de chuva.

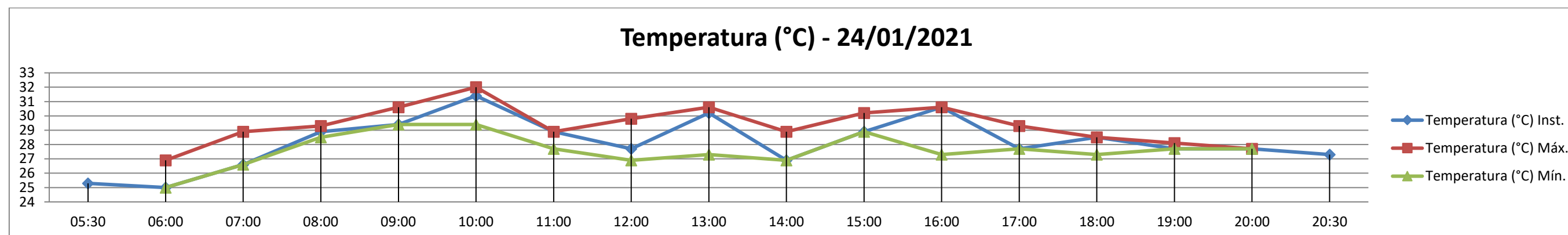
No dia 24/01, a média de temperatura do ar foi de 28,2°C, com oscilações que compreendem a mínima de 25°C e máxima de 32°C. A média da umidade relativa foi relativamente baixa, 60,5%. A pressão oscilou de 1011,8mb a 1015,6mb

e os ventos predominaram das 07:00 às 20:00, com velocidades entre 0,4m/s e 1,8m/s, nas direções leste, sudeste, sul, nordeste e norte (Gráficos 1, 2 e 3). Comportamentos semelhantes foram observados no dia seguinte, 25/01: a umidade relativa do ar manteve-se em 60% e a média térmica foi de 29,1°C. As temperaturas variaram entre 25°C e 32,9°C e os ventos ocorreram entre as 10 e 17 horas, com velocidade entre 0,4m/s e 1,8m/s (direções leste, oeste, sul e sudoeste) (Gráficos 4, 5 e 6).

Em relação ao dia 31/01, foi o dia de maior temperatura horária (29,5°C) registrada de todo o experimento de campo e, conseqüentemente, o de menor umidade relativa do ar (58,8%). As temperaturas diárias variaram de 26,6°C a 37°C e a umidade relativa do ar oscilou entre 42% e 72%. A pressão atmosférica manteve-se constante até às 13 horas no valor de 1013mb, declinando para 1008,8mb até o final do experimento. Novamente os ventos predominaram entre as 07 e 20 horas, com velocidades que variaram entre 0,4 e 1,8m/s (leste, oeste, sul e sudeste) (Gráficos 7, 8 e 9).

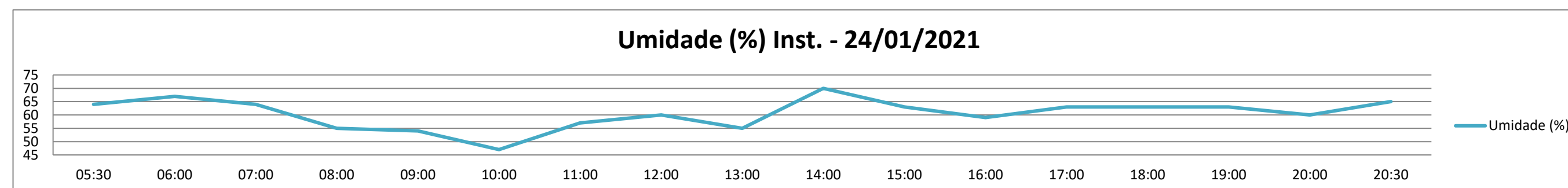
Já os dias 14/03 e 15/03 apresentaram um comportamento dos elementos atmosféricos de maneira similar. Foram os dois dias dos experimentos de situação de estabilidade que manifestaram as menores médias de temperatura do ar (27,4°C – 14/03 e 27,7°C - 15/03). Nesses dias, a umidade da atmosfera também esteve mais elevada, registrando 74,4%, em 14/03, e 71,3%, em 15/03. A pressão manteve-se constante no valor de 1013,8mb. A distinção entre eles esteve associada à maior participação do vento no dia 14/03, com velocidade de 0,9m/s até 2,2m/s, durante quase todo o dia do experimento. Por outro lado, no dia 25/05, os ventos atuaram somente às 20:00 (0,9m/s) e 20:30 (2,6m/s) (Gráficos 10, 11, 12, 13, 14 e 15).

Gráfico 1 – Temperatura horária da estação meteorológica no dia 24/01/2021.



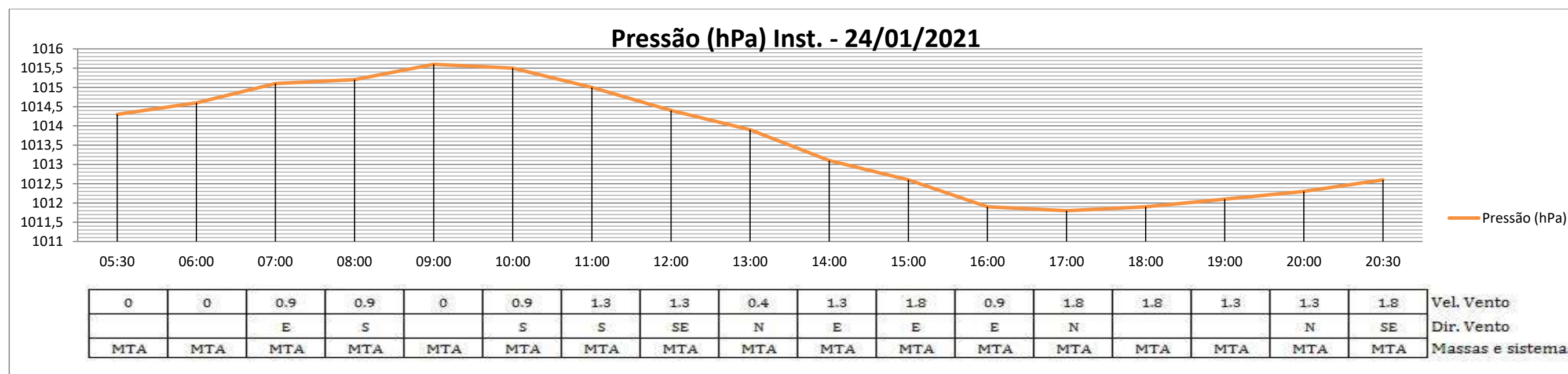
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 2 - Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 24/01/2021.



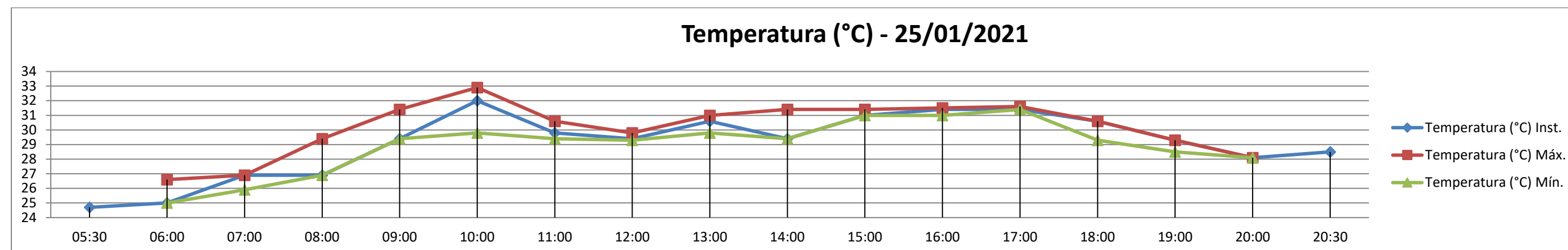
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 3 - Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 24/01/2021.



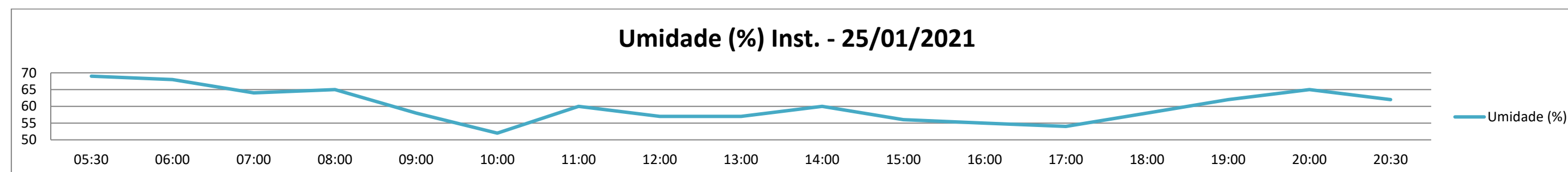
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 4 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 25/01/2021.



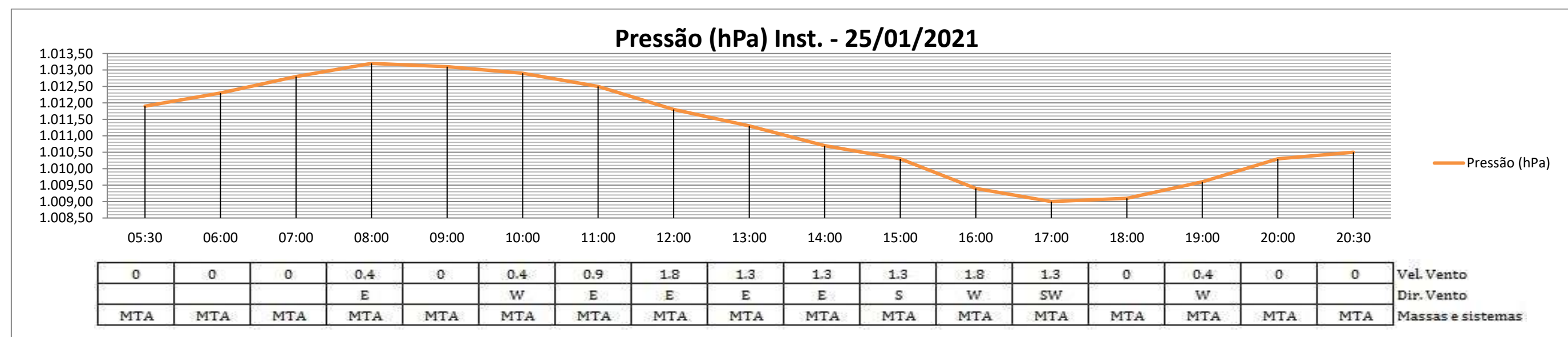
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 5 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 25/01/2021.



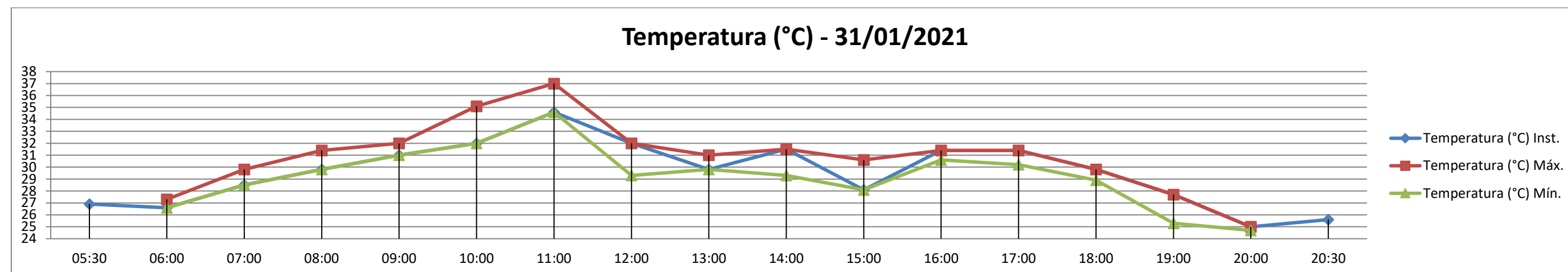
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 6 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 25/01/2021.



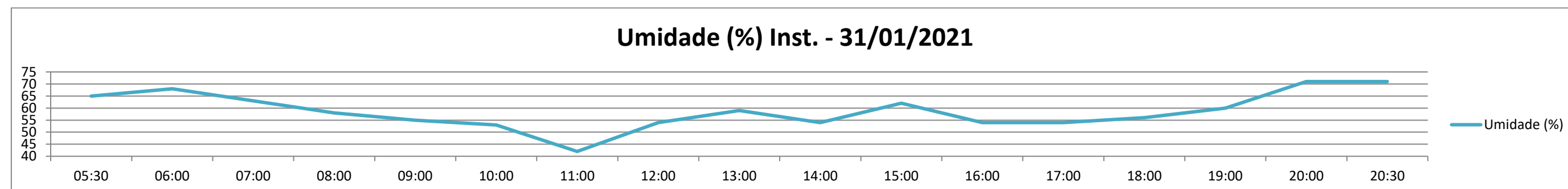
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 7 - Temperatura horária da estação meteorológica do dia 31/01/2021.



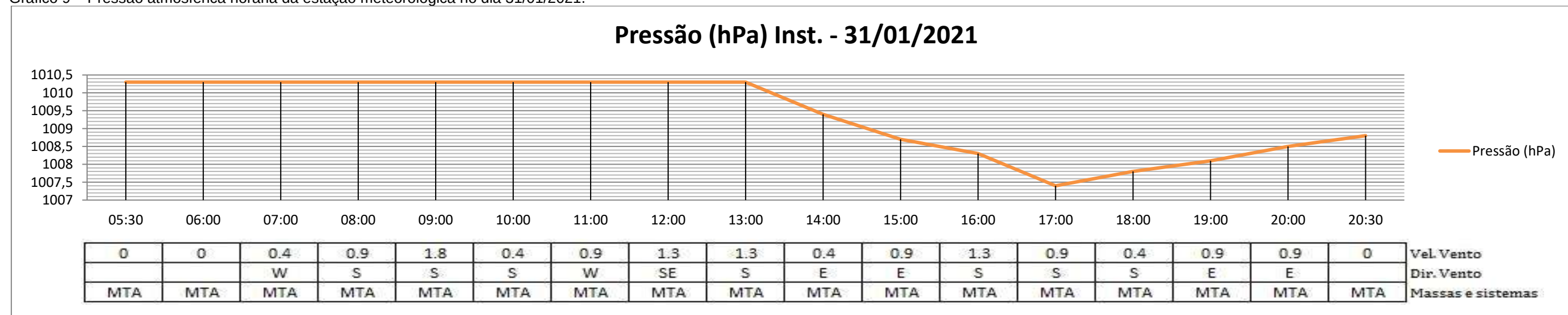
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 8 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 31/01/2021.



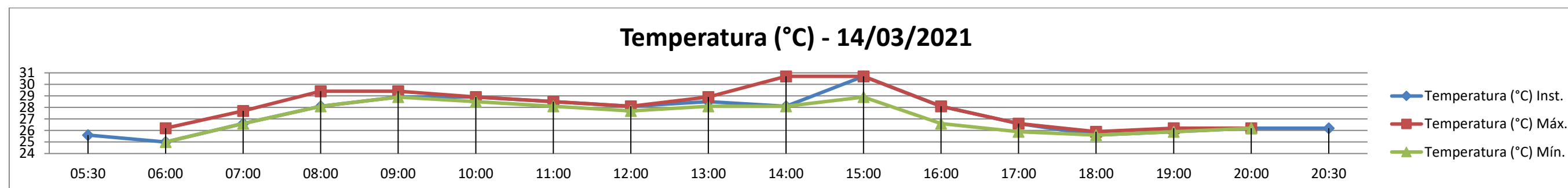
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 9 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 31/01/2021.



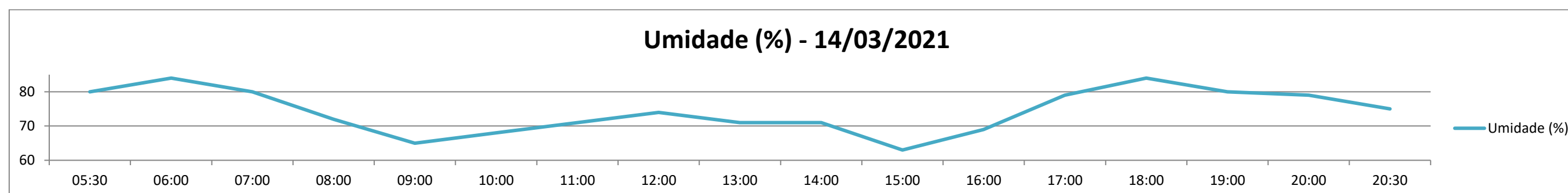
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 10 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 14/03/2021.



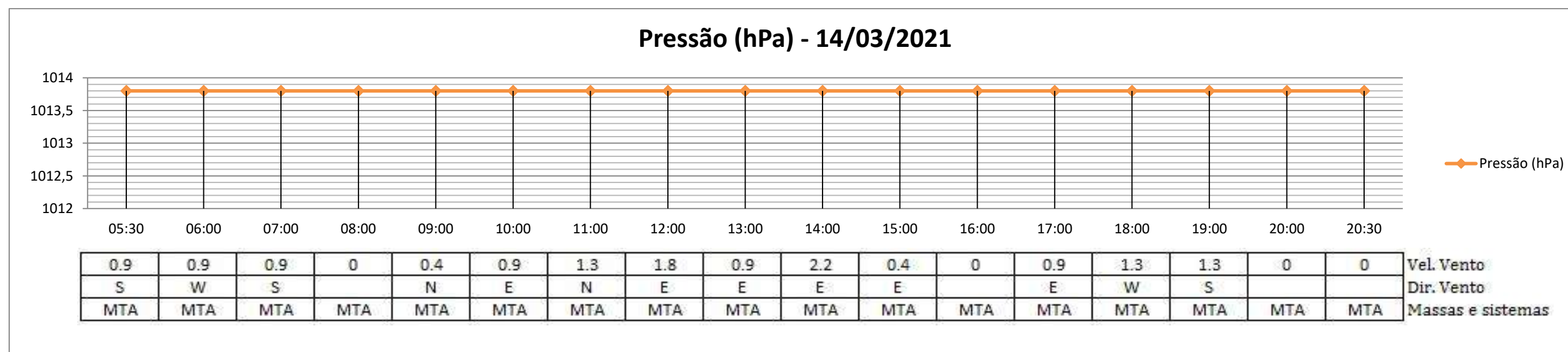
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 11 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 14/03/2021.



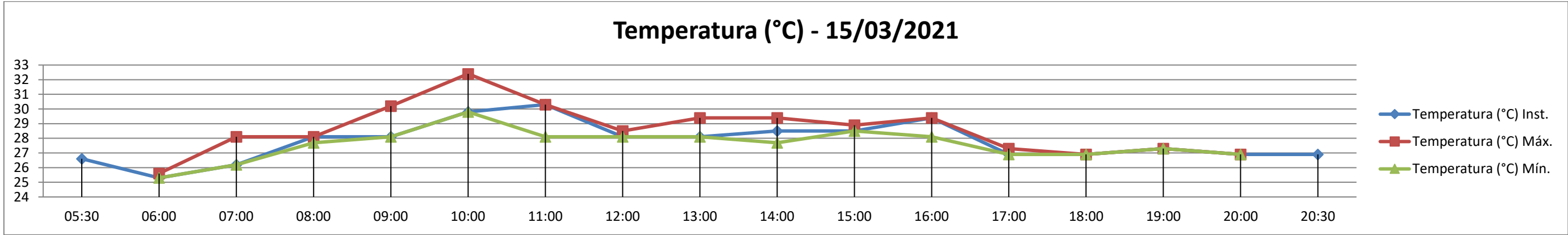
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 12 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 14/03/2021.



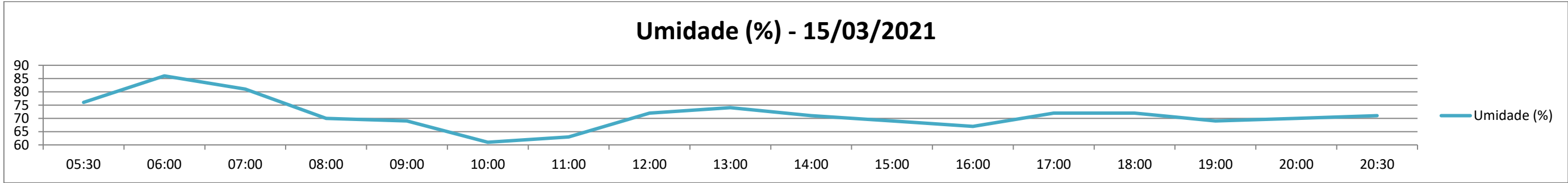
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 13 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 15/03/2021.



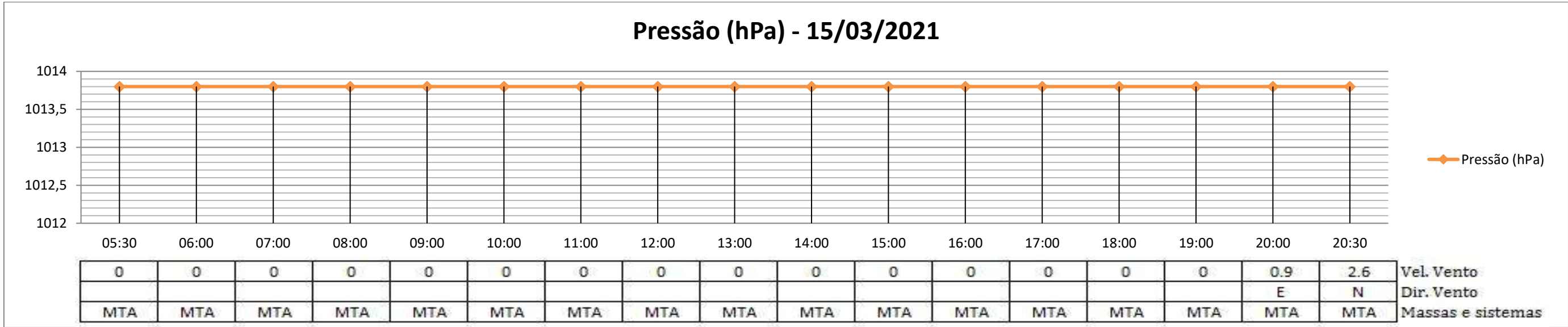
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 14 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 15/03/2021.



Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 15 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 15/03/2021.



Fonte: A autora, 2021.

4.4.1.1 Configuração térmica horizontal e vertical em situação de estabilidade

Em suma, os sistemas produtores de estabilidade atmosférica determinaram as condições de tempo na ocasião dos experimentos dos dias 24/01, 25/01, 31/01, 14/03 e 15/03 que favoreceram as respostas microclimáticas horizontais geradas pela morfologia urbana e, conseqüentemente a mobilidade espaço-temporal da ilha de calor, ao longo dos transectos. Além disso, a repercussão sinótica de tempo bom propiciou a formação de ilhas de calor de magnitude máxima.

Conforme a análise dos dados, no *Central Business Distric* do Rio de Janeiro, foi observada a configuração de ilhas de calor de até muito forte magnitude, cujas medidas de diferença estão acima de 6,1°C (Figura 36, 37, 38, 39 e 40). Isso evidencia a eficiência das propriedades dos materiais construtivos na absorção de ondas curtas, emissão e condutância de ondas longas, que associada à rugosidade da morfologia urbana do CBD, capacita à absorção e conservação de energia (OKE, 1978; TAHA, 1997; VOOGT, 2002; RIZWAN, 2007).

Em linhas gerais, as ilhas de calor matutina (6 horas) e noturnas (20 horas) oscilaram de fraca (0,1°C a 2°C) a moderada magnitude (2,1 a 4,0°C) e a ilha vespertina de fraca a muito forte magnitude (acima de 6,1°C). Assim, é possível perceber que, destacadamente, tanto no transecto 1 quanto no transecto 2, o horário das 13 horas foi o concentrador das cores térmicas (Figura 36, 37, 38, 39 e 40).

Esse resultado diverge da literatura nacional e internacional, que aponta o período noturno, nos espaços marcados pela morfologia dos *canyons* urbanos, como os detentores das ilhas de calor de maiores intensidades. Oke (1978), Voogt (2002), Mendonça e Danni-Olivera (2007) apontam que a menor habilidade de liberação de ondas longas à noite está associada ao arranjo dos prédios e, sobretudo, à redução do *sky view factor*. Embora, os dados de ventos levantados durante os experimentos de campo sejam insuficientes para confirmar a hipótese, infere-se que, possivelmente, a redução da ilha de calor noturna esteja relacionada à canalização das brisas ao longo do *canyon* da Avenida Rio Branco, dada as direções predominantes dos ventos de sul/sudeste e norte/nordeste ao longos dos transectos 1 e 2, respectivamente.

No transecto 1, as cores das ilhas de calor oscilaram, predominantemente, entre o Obelisco da Avenida Rio Branco (ponto 1) e a Avenida Rio Branco/Rua do

Ouvidor (ponto 4) durante os três horários de coleta (06, 13 e 20 horas). Em relação ao Obelisco da Avenida Rio Branco, sua morfologia urbana é marcada pelo baixo e médio potencial de cobertura do solo por edificação, o que garante a sua exposição direta à radiação solar e, conseqüentemente, a ausência do abrigo da projeção das sombras dos prédios. Essa característica favorece tanto o rápido aquecimento quanto o desprendimento de energia para o resfriamento da temperatura do ar. Em razão disso, suas cores foram matutinas (6 horas), coincidindo com o início do processo de aquecimento. Em demais horários, em geral, foi o ponto do transecto 1 que configurou as ilhas de menor intensidade. Contribuiu também para o seu arrefecimento o efeito bioclimático gerado pela presença de vegetação do tipo arbustiva e rasteira em seu entorno, além da maior proximidade com o aterro do Flamengo.

Já o ponto 4, situa-se entre as edificações que alcançam 100 metros e cujas quadras apresentam alto potencial de cobertura do solo (50% a 100%). Também os logradouros ao redor são mais estreitos, implicando em um arranjo espacial mais adensado, o que dificulta a circulação e renovação do ar. Em razão disso, esse ponto funcionou como um reservatório de energia, apresentando-se durante todos os dias (24/01, 25/01, 31/01, 14/03 e 15/03) como a core das ilhas noturnas. Esse resultado dialoga com a literatura ao evidenciar a eficiência da massa aglomerada e a redução do *sky view factor* na conservação das ondas longas liberadas e na elevação da temperatura do ar (OKE, 1978; TAHA, 1997; VOOGT, 2002; RIZWAN, 2007). Os estudos de Brandão (1996), em diferentes ambientes do CBD, também relacionaram os núcleos de cargas térmicas mais elevadas aos eixos mais verticalizados (*sky view factor* - SVF entre 60% e 88%).

Em geral, no transecto 1, observou-se um perfil têmporo-espacial de tendência de intensidade crescente da ilha de calor na medida que se parte do ponto 1 (Obelisco da Avenida Rio Branco) ao 4 (Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor). Isto é, quando se adentra o *canyon* urbano e se aprofunda a rugosidade e o volume edificado.

Considerando os cinco dias de experimento de campo, no transecto 1, as cores registradas manifestaram as seguintes intensidades: dia 24/01, manhã 1,3°C no Obelisco, tarde 4,4°C e noite 0,4°C na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor; dia 25/01, manhã 3,1°C no Obelisco, tarde 11,8°C e noite 2°C na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor; 31/01, manhã 1,3°C no Obelisco, tarde 5°C na Avenida Rio

Branco/Avenida Nilo Peçanha e noite 5°C na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor; dia 14/03, manhã 1,5°C e noite 3,2°C na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor e tarde 6°C na Avenida Rio Branco/Fundação Biblioteca Nacional; dia 15/03, manhã 1,2°C e noite 1,6°C na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor e tarde 4.5°C na Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha.

Ressalta-se que as cores observadas acima, no período vespertino, relacionadas à Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha (avenida de largo cruzamento entre os logradouros e prédios acima de 100 metros), possivelmente encontram justificativa no fato de às 13 horas existir maior fluxo de veículo nestas vias principais do CBD e, portanto, maior liberação de calor.

No transecto 2, a core da ilha de calor oscilou entre a Praça Mauá (ponto 7) e a Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas (ponto 5). A Praça Mauá embora seja um espaço aberto (médio potencial de cobertura do solo), com poucas edificações ao redor (Museu do Amanhã, Odontoclínica da Marinha e o Serviço Social da Marinha), é um espaço árido (sem vegetação e com extensas superfícies impermeáveis), apesar de sua proximidade ao mar. Sua lógica de conservação e desprendimento de energia, portanto, segue a mesma linha de raciocínio da configuração das ilhas no Obelisco da Avenida Rio Branco. Nesse sentido, a projeção desse ponto como core aconteceu à tarde (maior incidência da radiação solar). Já a Avenida Rio Branco/Presidente Vargas (ponto 4) guarda a particularidade de ser o ponto entre as duas avenidas mais movimentadas do CBD (implicando em fluxos de veículos e pessoas) e cuja alturas das edificações estão acima de 50 metros e inseridas em quadras que apresentam alto potencial de cobertura do solo por edificação (50% a 100%). Suas cores foram matutinas e noturnas.

Assim, em linhas gerais, o transecto 2 apresentou intensidade crescente de ilha de calor pela manhã e pela noite, da Praça Mauá (ponto 7) até a Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas (ponto 5), evidenciando a capacidade de estocagem de energia da massa edificada. Contudo, houve intensidade decrescente durante o período da tarde, do ponto 7 ao 5. Neste caso, pode ser que em alguma medida o corredor de prédio que projeta grandes sombras, formem artificialmente zonas com temperaturas mais amenas, à semelhança do que acontece com a Avenida Paulista, segundo Lombardo (2005).

Considerando os cinco dias de experimento de campo, no transecto 2, as cores registradas manifestaram as seguintes intensidades: dia 24/01, manhã 1,6°C e noite 0,3°C na Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas e tarde 5,3°C na Praça Mauá; 25/01, manhã 1,9°C e noite 1,7°C na Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas e tarde 8,3°C na Praça Mauá; 31/01, manhã 1,1°C e tarde 6,9°C na Praça Mauá e noite 4,3°C na Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas; 14/03, manhã 1,2°C e noite 1,7°C na Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas e tarde 3,8°C na Praça Mauá; 15/03, manhã 1,3°C, tarde 5,2°C e noite 1,2°C na Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas.

Importante ressaltar que, a partir da análise do mapeamento do campo térmico, identificou-se que as ilhas de calor de maiores intensidades encontradas durante todo o experimento de campo do verão de 2021, configuradas na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (11,8°C) e na Praça Mauá (8,3°C), não correspondem ao dia de maior registro de temperatura da estação meteorológica de controle, mas sim à segunda-feira (25/01) (Figura 36, 37, 38, 39 e 40). É provável que, neste dia, marcado por intensa dinâmica (típica do CBD da cidade capitalista) na Avenida Rio Branco, o calor antropogênico tenha contribuído de maneira direta (liberação de calor pelo metabolismo) e indireta (advindo do uso de energia das construções (refrigeradores) e de fluxos de veículos) (OKE, 1978; TAHA, 1997; VOOGT, 2002; RIZWAN, 2007).

No que se refere às ilhas mais frescas, estas ficaram restritas ao dia 24/01, às 13:00, no Obelisco da Avenida Rio Branco, e às 20:00, na Praça Mauá, ou seja, nos dois únicos pontos que compreendem espaços abertos e de menor rugosidade (Figura 36, 37, 38, 39 e 40). Devido às suas características morfológicas (com usos comercial, administrativo e financeiro), percebe-se que Avenida Rio Branco apresenta baixo potencial de resfriamento.

Pela análise da configuração térmica horizontal dos transectos, foi possível também identificar os pontos de maior e menor eficiência em relação ao armazenamento de calor, ao longo de um dia. As taxas de aquecimento apontam como os espaços mais críticos de cada transecto a Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor e a Praça Mauá, respectivamente, do transecto 1 e 2. Enquanto, o Obelisco e a Avenida Rio Branco/Presidente Vargas o de menor eficiência (Gráficos 16, 23, 24, 29 e 34).

Em relação à investigação do perfil vertical de temperatura do ar e umidade relativa, somente houve coleta nos dias 24/01, 31/01 e 14/03. Novamente chama-se a atenção para o fato de que no dia 31/01, às 13 horas, a aeronave despencou e em 14/03 o *datalogger* desligou durante o voo noturno. Portanto, não há registros capturados para os referidos dias e horários.

As sondagens aconteceram no Largo da Carioca, ponto de referência escolhido por guardar particularidades do *canyon* urbano, com edificações ao redor que alcançam 120 metros. No Largo da Carioca, o perfil vertical dos dias de estabilidade mostra que, considerando os três horários de coletas (06, 13 e 20 horas), o período vespertino foi o de maior expressão de temperatura do ar e menor umidade relativa.

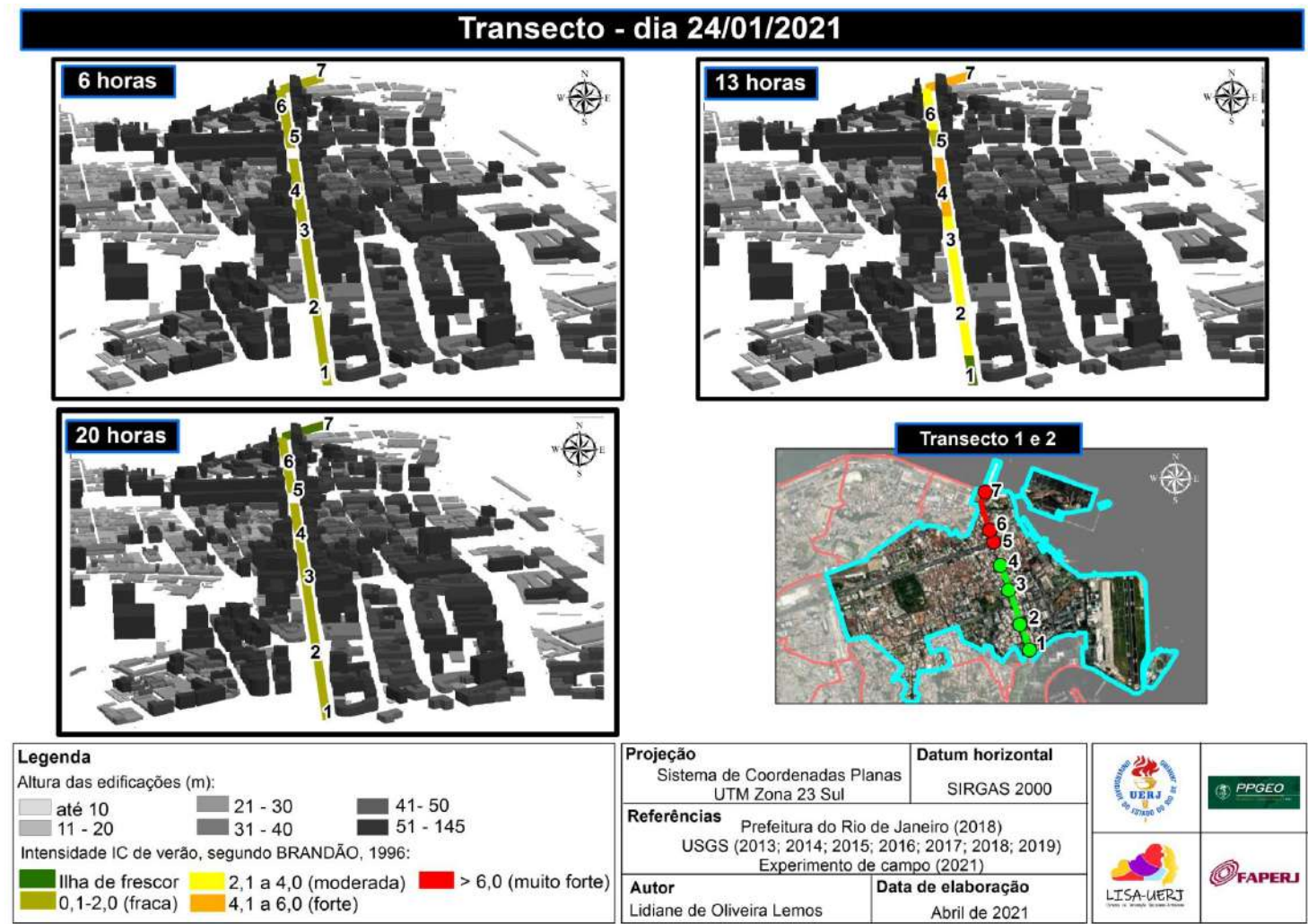
No dia 24/01, pela manhã, a variação vertical da temperatura entre as diferentes altitudes foi de no máximo 0,5°C. Houve indício de inversão térmica em 40 metros (25,5°C) em relação a 30 metros (25,3°C). Contudo, não se pode afirmar que se trata de uma inversão térmica, tendo em vista que a diferença de 0,2°C encontra-se dentro do *range* de erro (+/- 1,0°C) do *datalogger*. Às 13 horas foram identificados os maiores gradientes entre o ar próximo à superfície (40,6°C) e o ar em 50 metros (36,9°C). Neste horário, também ocorreu indício de inversão térmica dentro do *range* de erro do equipamento em 50 metros (36,9°C) em relação a 40 metros (36,7°C). Já o comportamento noturno da temperatura do ar, seguiu tendência decrescente com o chão registrando 28,1°C e 50 metros marcando 27,4°C (Gráficos 17, 18, 19, 20, 21 e 22).

O dia 31/01 é marcado por uma persistência de indícios de inversão térmica até 30 metros em relação ao chão, às 06 horas. Enquanto o chão registrava 26,8°C, em 30 metros a temperatura do ar indicava 27°C. Não obstante, é no horário noturno que notamos de fato uma inversão térmica bem caracterizada ocorrendo, uma vez que a temperatura do ar, registrada na altitude máxima (28,5°C) ficou 2,3°C acima daquela obtida ao nível da rua e fora do *range* de erro do *datalogger*. Neste dia de estabilidade atmosférica, cujas condições sinóticas foram propícias ao maior registro médio de temperatura do ar (29,5°C) e favoráveis à inversão térmica, apesar do verão, observou-se que em nível regional a radiossonda do Galeão não detectou inversões térmicas. Essa constatação leva à hipótese de que possivelmente a rugosidade e o volume de edificações presentes no Largo da Carioca pode ter forçado a configuração do fenômeno (Gráficos 25, 26, 27 e 28).

Por fim, o dia 14/03 também apresentou indícios de inversão térmica nos horários matutino e vespertino, ambos nas altitudes de 50 metros em relação a 40 metros. Enquanto pela manhã, as medidas de diferenças não ultrapassaram, nas diferentes altitudes, o gradiente de $1,1^{\circ}\text{C}$, à tarde o gradiente foi superior, $2,6^{\circ}\text{C}$ (Gráficos 30, 31, 33 e 34).

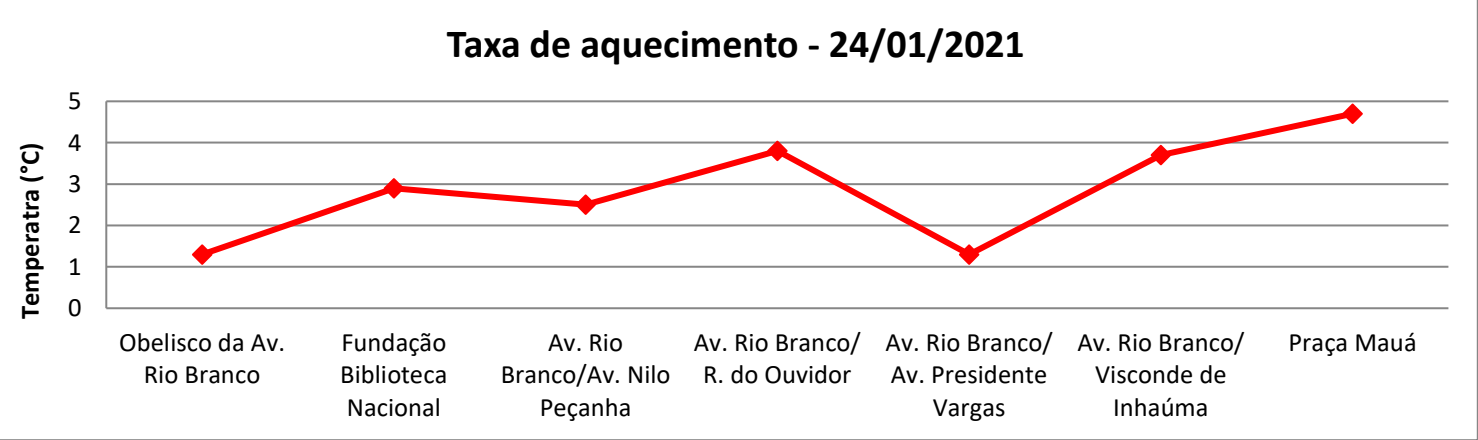
De maneira geral, observa-se que a temperatura e umidade relativa do ar seguem o comportamento inversamente proporcional.

Figura 36 – Campo térmico no dia 24/01/2021.



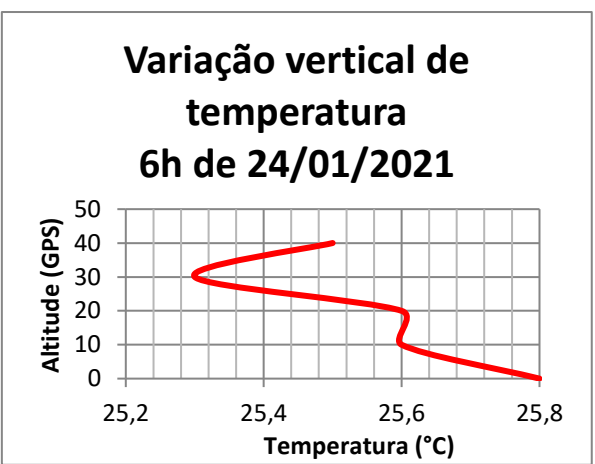
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 16 – Taxa de aquecimento no dia 24/01/2021.



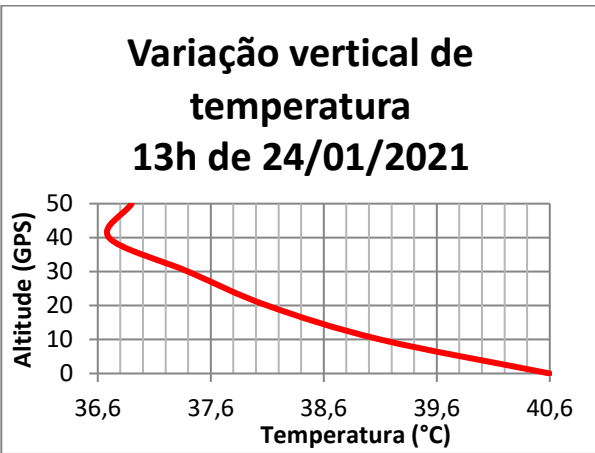
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 17 - Temperatura vertical às 6h no dia 24/01.



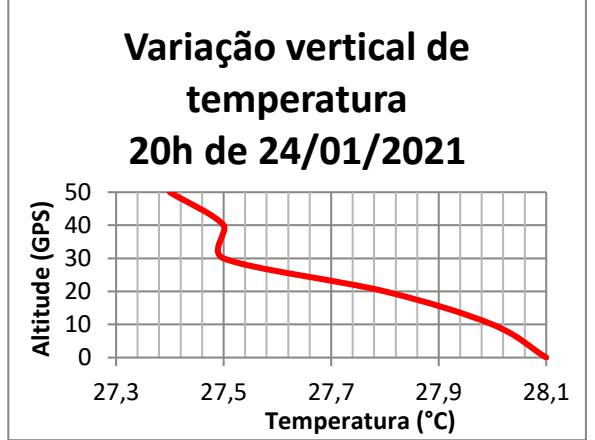
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 18 – Temperatura vertical às 13h no dia 24/01.



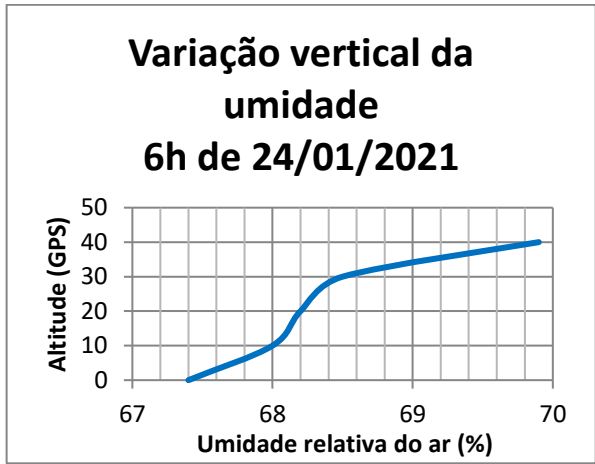
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 19 - Temperatura vertical às 20h no dia 24/01.



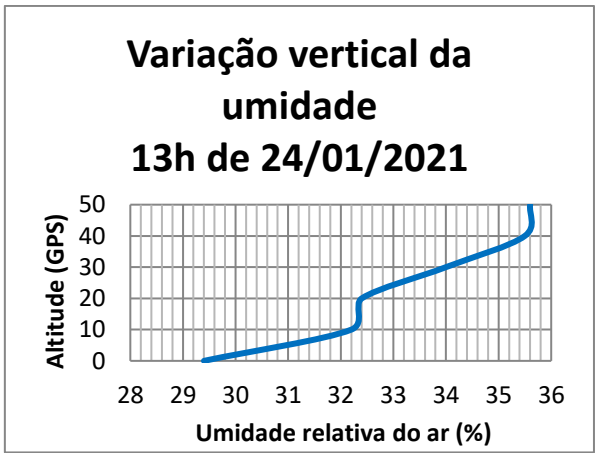
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 20 - Umidade vertical às 6h no dia 24/01.



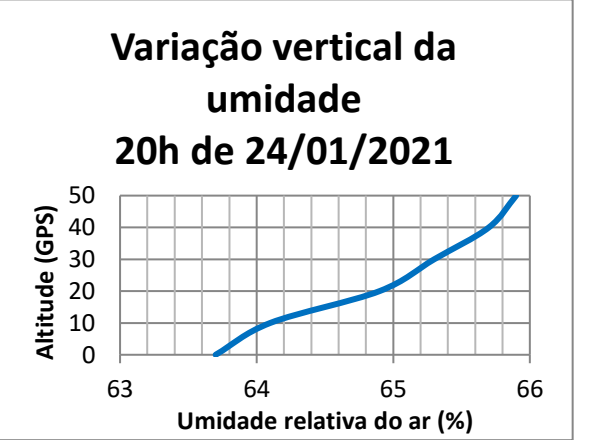
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 21 - Umidade vertical às 13h no dia 24/01.



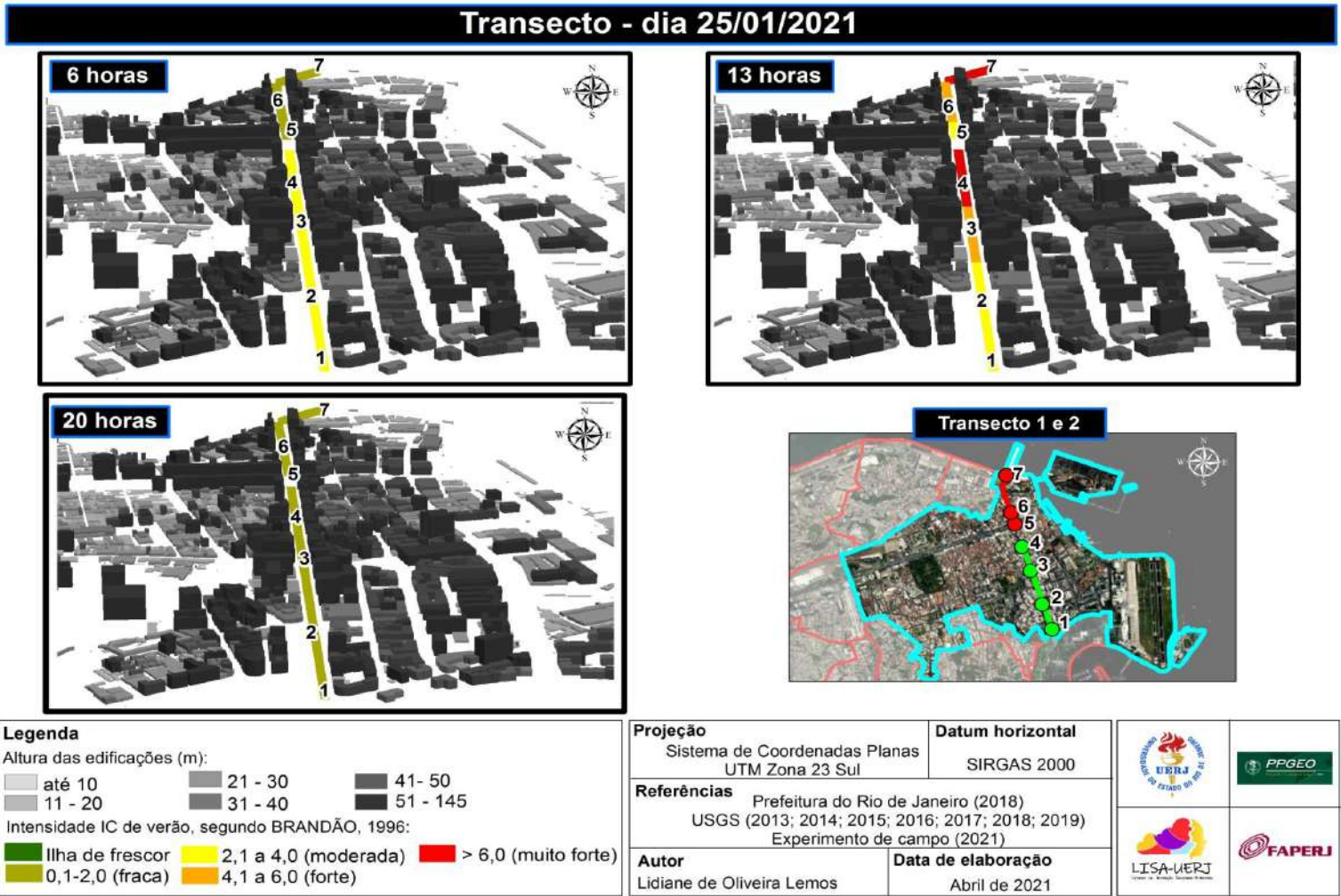
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 22 - Umidade vertical às 20h no dia 24/01.



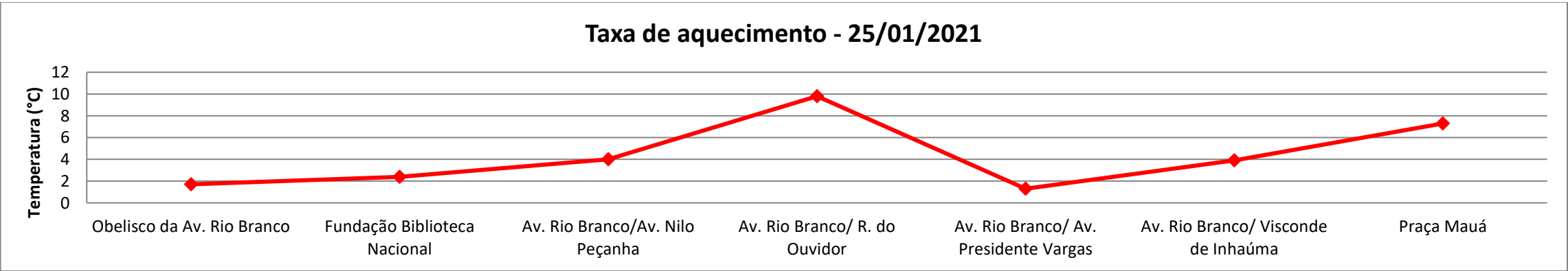
Fonte: A autora (2021).

Figura 37 - Campo térmico no dia 25/01/2021.



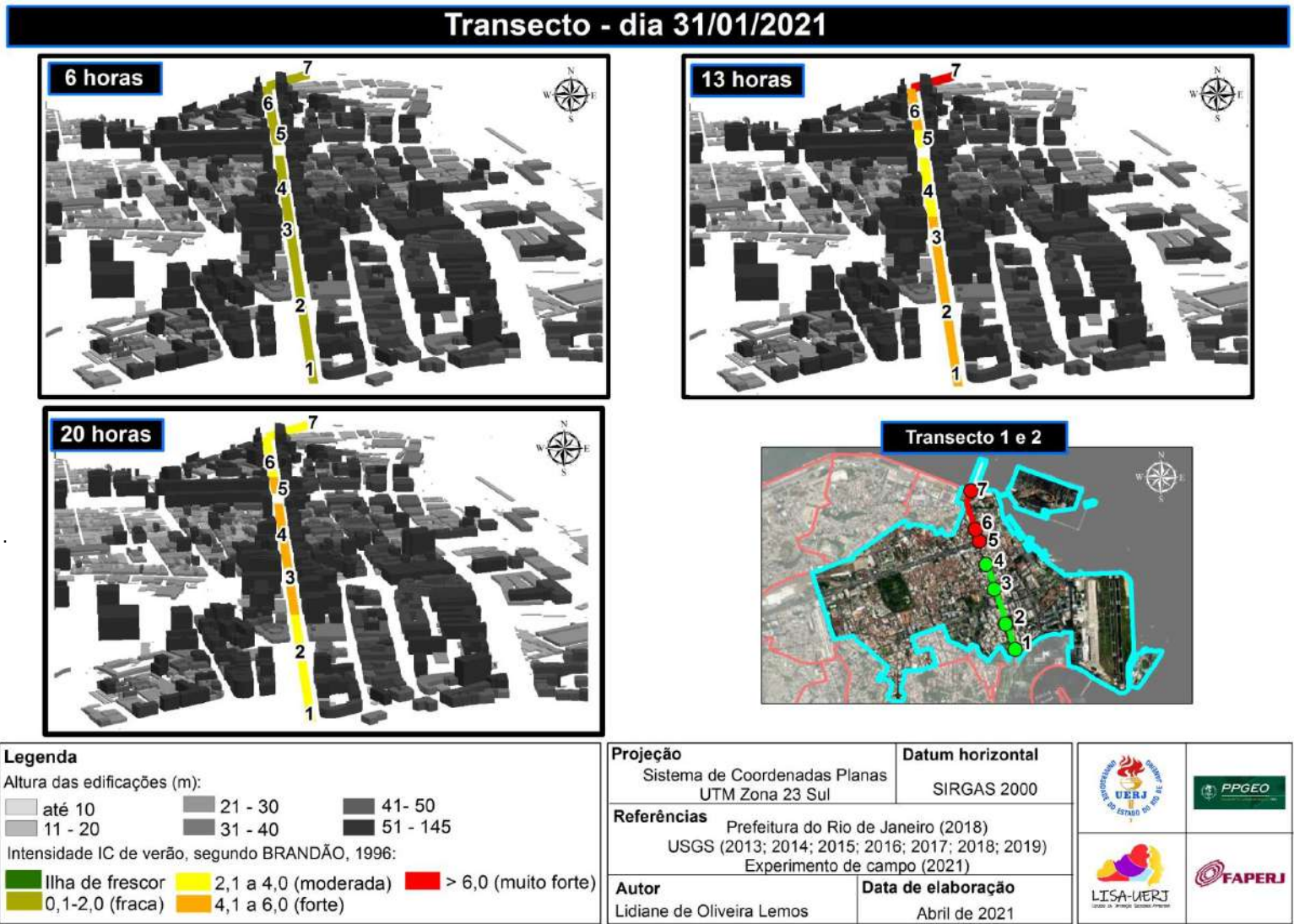
Fonte: A autora (2021); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018). Elaborado pela autora, 2021.

Gráfico 23 – Taxa de aquecimento no dia 25/01/2021.



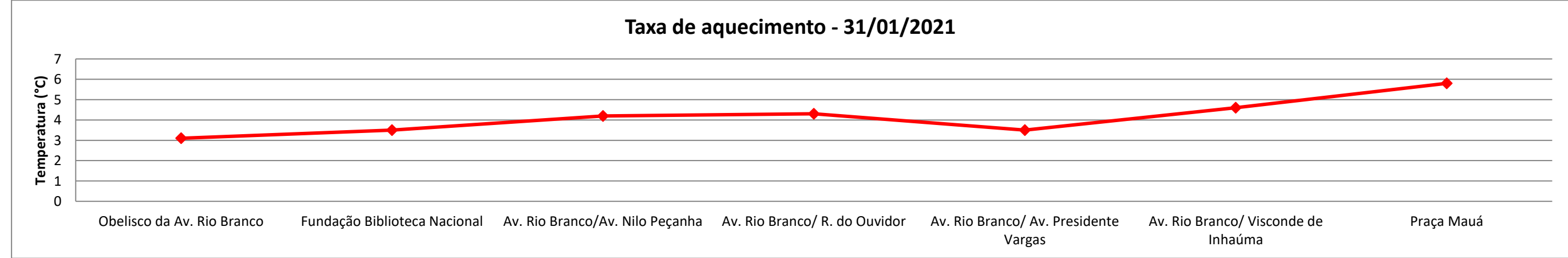
Fonte: A autora (2021).

Figura 38 - Campo térmico no dia 31/01/2021.



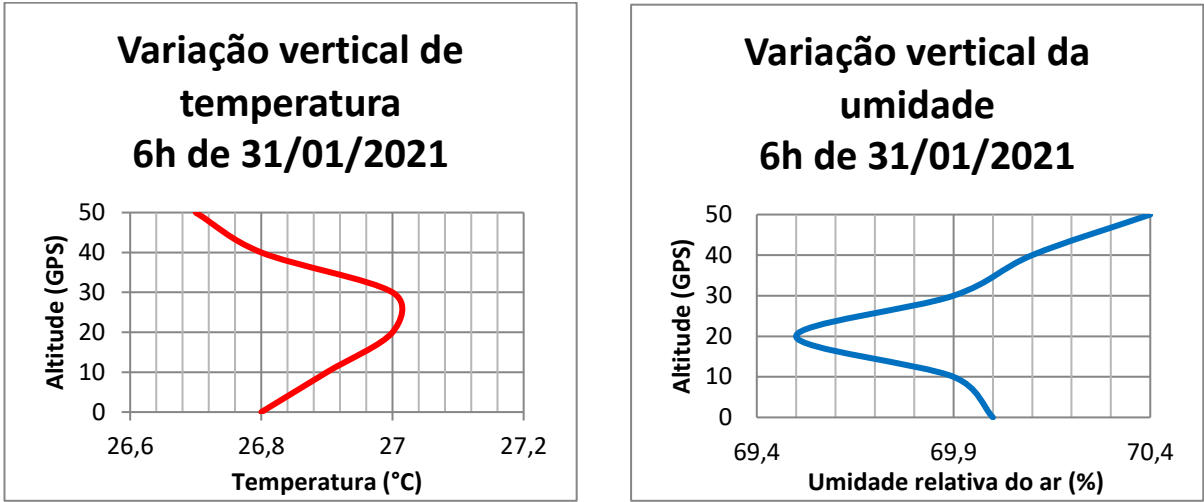
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 24 – Taxa de variação de aquecimento no dia 31/01/2021.



Fonte: A autora (2021).

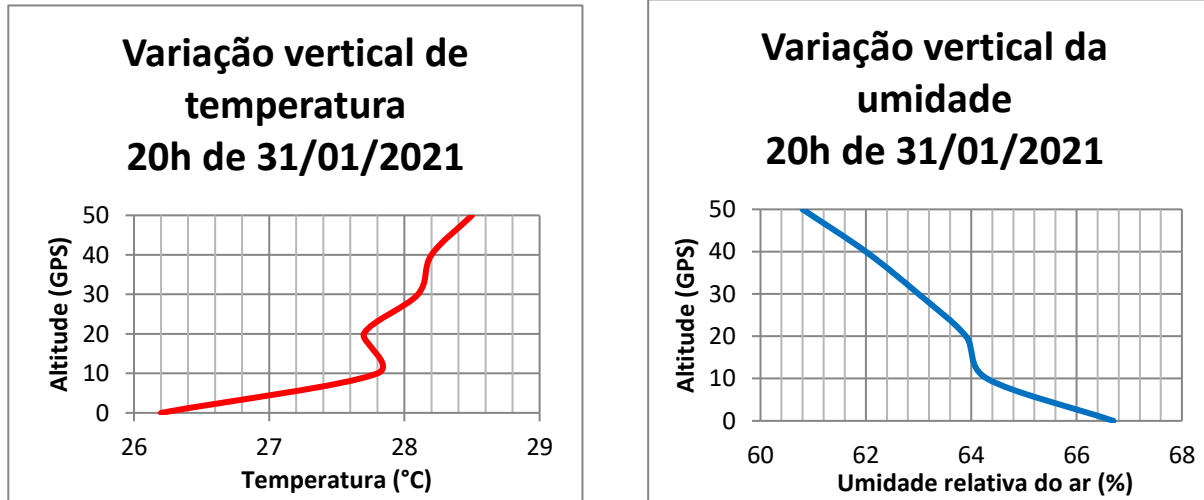
Gráfico 25 – temperatura vertical às 6h no dia 31/01. Gráfico 27 – Umidade vertical às 6h no dia 31/01.



Fonte: A autora (2021).

Fonte: A autora (2021).

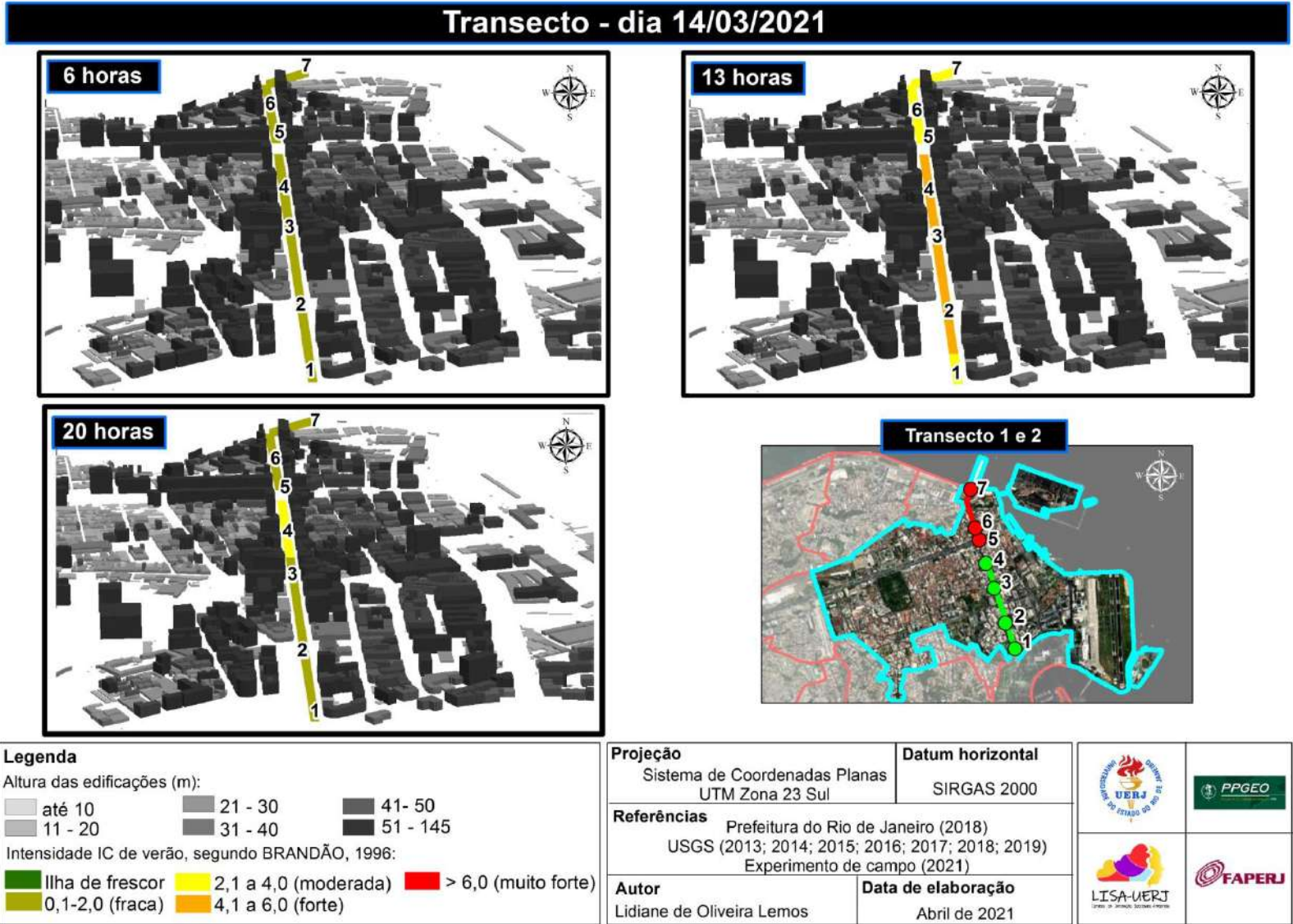
Gráfico 26 – temperatura vertical às 20h no dia 31/01. Gráfico 28 – Umidade vertical às 20h no dia 31/01



Fonte: A autora (2021).

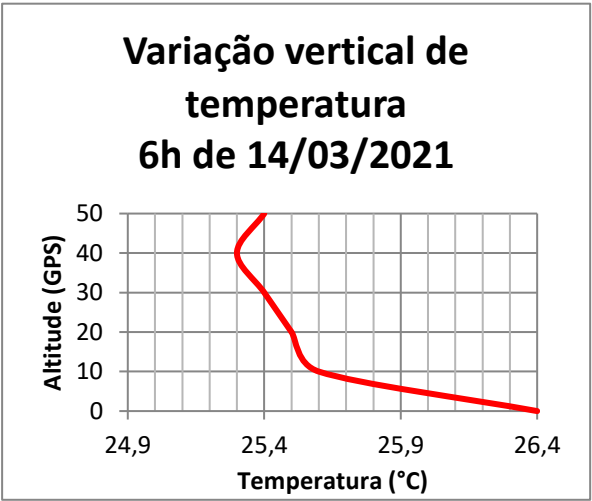
Fonte: A autora (2021).

Figura 39 - Campo térmico no dia 14/03/2021.

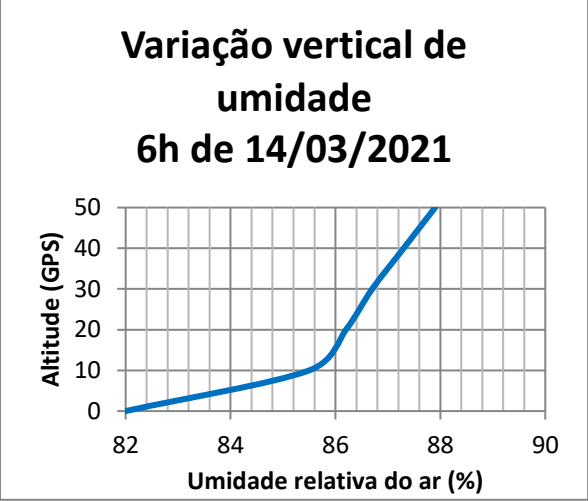


Fonte: A autora (2021).

Gráfico 30 – Temperatura vertical às 6h no dia 14/03. Gráfico 32 – Umidade vertical às 6h no dia 14/03.

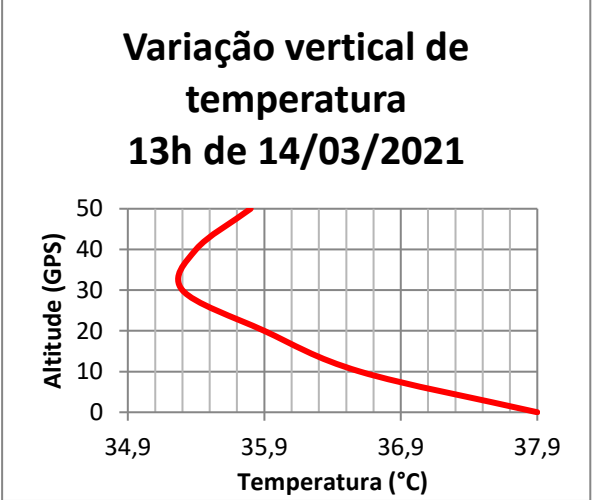


Fonte: A autora (2021).

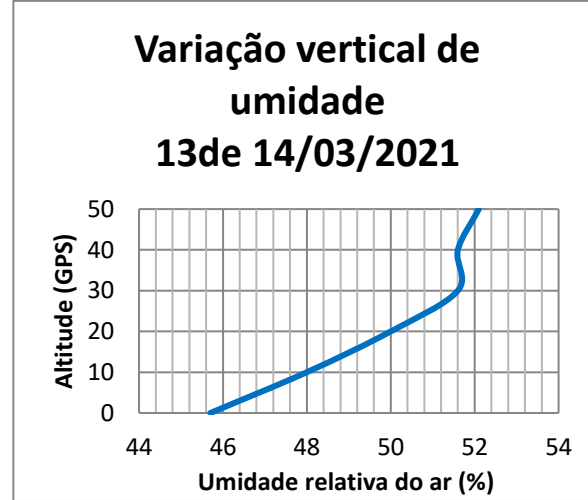


Fonte: A autora (2021).

Gráfico 31 – Temperatura vertical às 13h no dia 14/03. Gráfico 33 – Umidade vertical às 6h no dia 14/03.

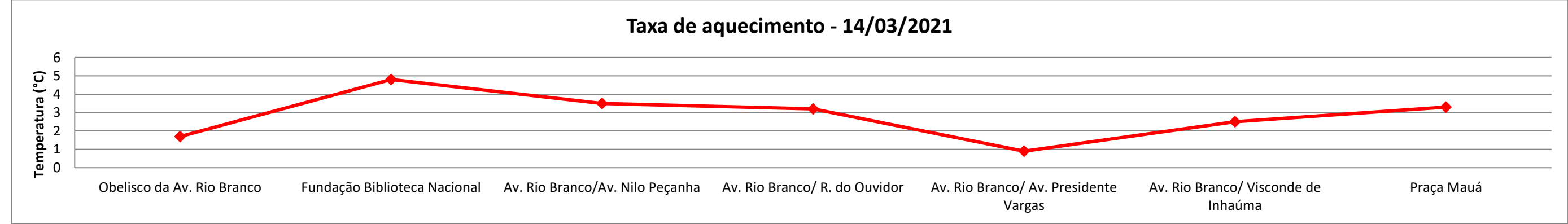


Fonte: A autora (2021).



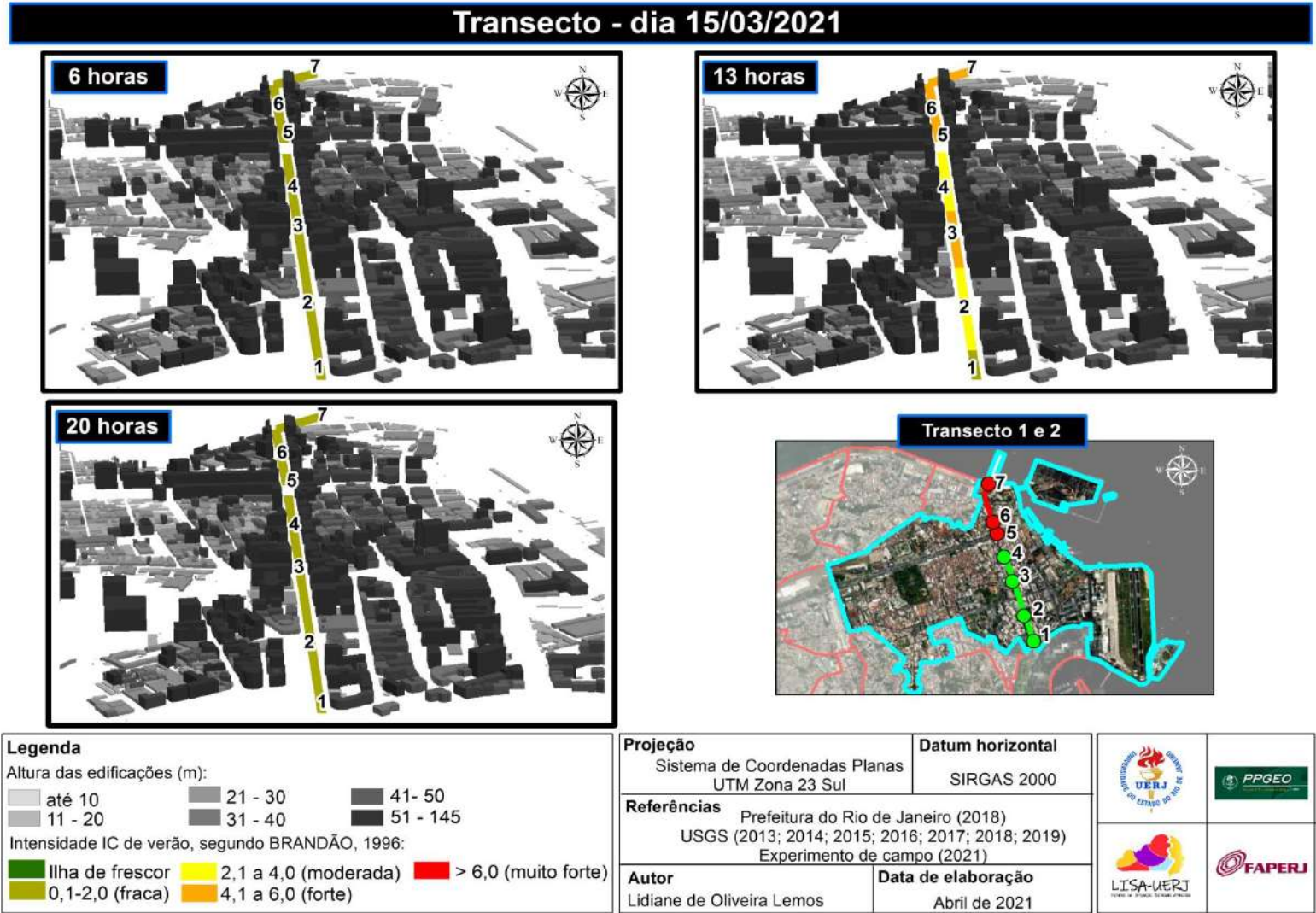
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 29 – Taxa de aquecimento no dia 14/03/2021.



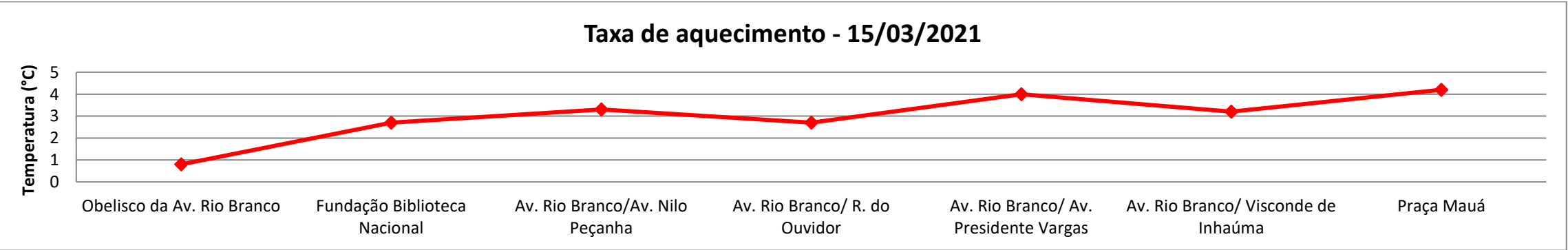
Fonte: A autora (2021).

Figura 40 - Campo térmico no dia 15/03/2021.



Fonte: A autora (2021); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018). Elaborado pela autora, 2021.

Gráfico 34 – Taxa de aquecimento no dia 15/03/2021.



Fonte: A autora (2021).

4.4.2. Campo térmico em situação sinótica de instabilidade atmosférica

O enquadramento sinótico dos dias 14 de fevereiro (domingo), 22 de fevereiro (segunda-feira) e 07 de março (domingo), conforme mostrado pelas cartas da Marinha do Brasil, indica que o tipo de tempo atuante sobre o município do Rio de Janeiro não era considerado favorável à manifestação da ilha de calor (Anexo B). Confirma o processo atmosférico de instabilidade, que favorece os movimentos de ascensão do ar, os índices termodinâmico das radiossondas dos referidos dias, como mostra a tabela abaixo (Tabela 9).

Tabela 9 – Índices termodinâmicos em situação de equilíbrio instável.

Índices termodinâmicos						
00 UTC				12 UTC		
Dia	K	TT	CAPE	K	TT	CAPE
14/fev	34	43	273	33	45	341
22/fev	35	46	415	33	48	404
07/mar	38	44	0	34	43	71

Fonte: UNIFEI, 2021.

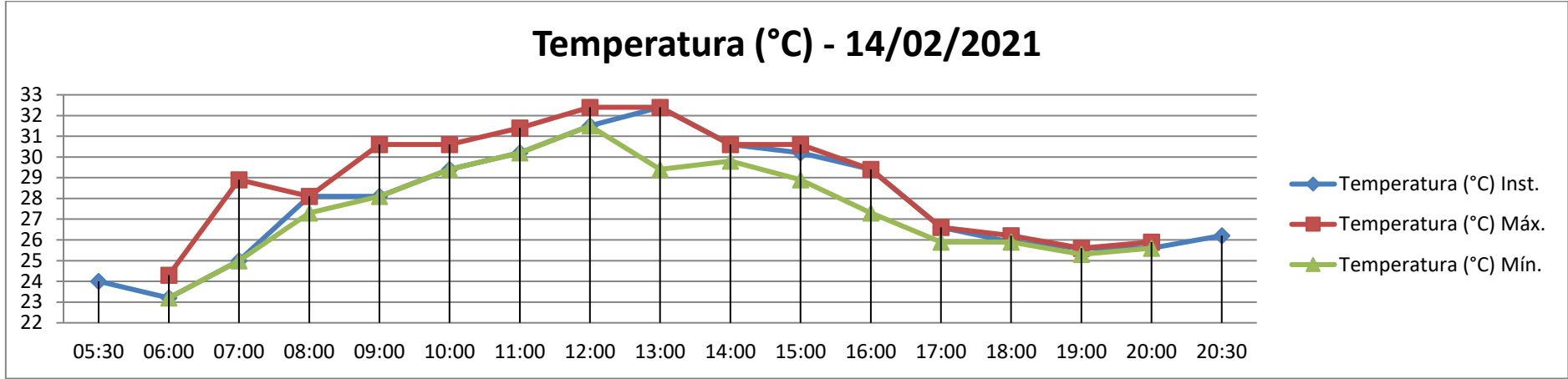
No dia 14 de fevereiro, o Rio de Janeiro sofreu a atuação da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), atraída por uma célula de baixa pressão oceânica, que se expandiu sobre o município, provocando diminuição do potencial isobárico, que marcou 1010mb. Tal condição foi responsável pelo aumento relativo de umidade, formação de nuvens, chuva, declínio de temperatura e ventos soprando de noroeste. A temperatura média do ar na estação de referência foi de 27,8°C. As temperaturas máximas e mínimas foram, respectivamente, de 32,4°C e 23,2°C. A umidade relativa média do ar foi de 69,7% e a pressão atmosférica esteve relativamente baixa, oscilando de 1006,4mb até 1009,7mb. Os ventos se concentraram entre 10 e 13 horas com velocidades que variaram de 0,4m/s a 0,9 m/s. Percebe-se que, ao longo do dia, a partir das 13 horas, quando a ação dos sistemas produtores de instabilidade se efetivaram, houve declínio de temperatura, aumento da umidade, queda na pressão atmosférica, resultando em chuva horária de 1,6mm e 24mm (Gráficos 35, 36, 37 e 38).

Já nos dias 22/02 e 07/03, os sistemas regionais atmosféricos foram conduzidos pela aproximação de uma frente fria (FF) vinda do oceano ao encontro da ZCAS, de atuação significativa sobre o continente, gerando condições sinóticas marcadas também pelo aumento da umidade relativa do ar, nebulosidade, chuva e ventos de noroeste.

Em relação ao dia 22/02, a temperatura máxima foi de 30,2°C e mínima de 22,9°C. Especificamente nos horários das 11 e 12 horas ocorreram os maiores amplitudes de temperatura do ar, 2,5°C e 5,2°C, respectivamente. Neste dia, logo após essa subida e descida sequencial de temperatura, a área de estudo apresentou elevada pluviosidade, 40 mm concentrado entre as 12 e 13 horas (pico de maior umidade 92%). Em 22/02, a umidade média foi de 79,5%, a pressão atmosférica manteve-se constante no valor de 1013mb e os ventos predominaram, sobretudo, entre as 8 e 17 horas com direções que variaram em nordeste, leste e sudoeste (Gráficos 39, 40, 41 e 42).

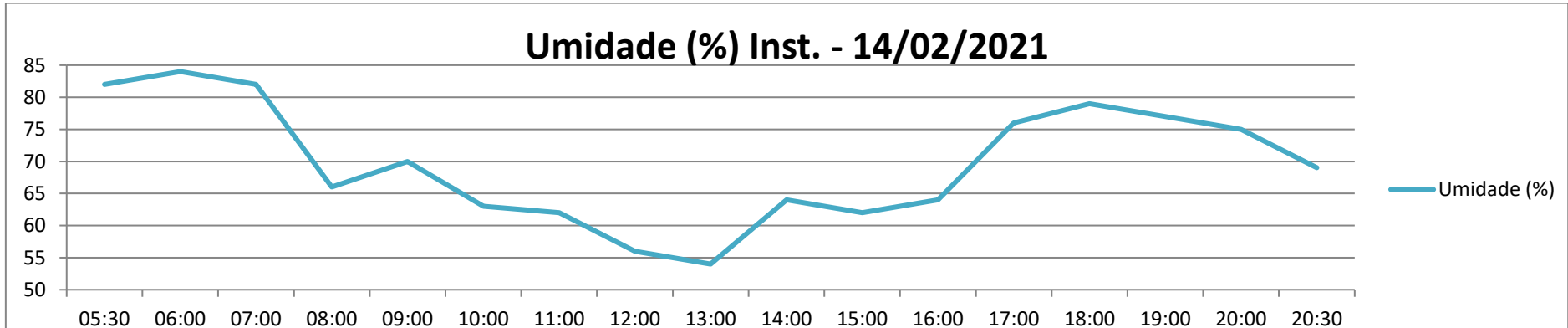
Para o dia 07/03, as temperaturas diárias variaram de 22,9°C a 27,3°C, com média de 24,8°C. A umidade relativa do ar ficou ligeiramente maior, 79,8%. Neste dia, houve ocorrência de chuva de 1,2mm e 1,4mm, às 10 e 11 horas, respectivamente. A pressão atmosférica variou de 1009,8mb a 1012,9mb (Gráficos 43, 44, 45 e 46).

Gráfico 35 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.



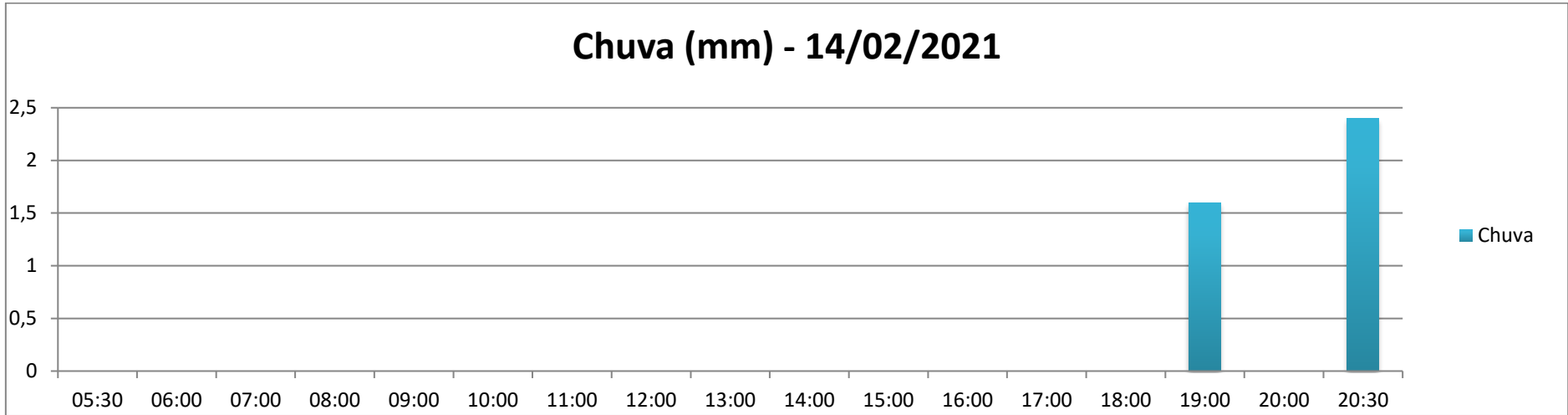
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 36 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.



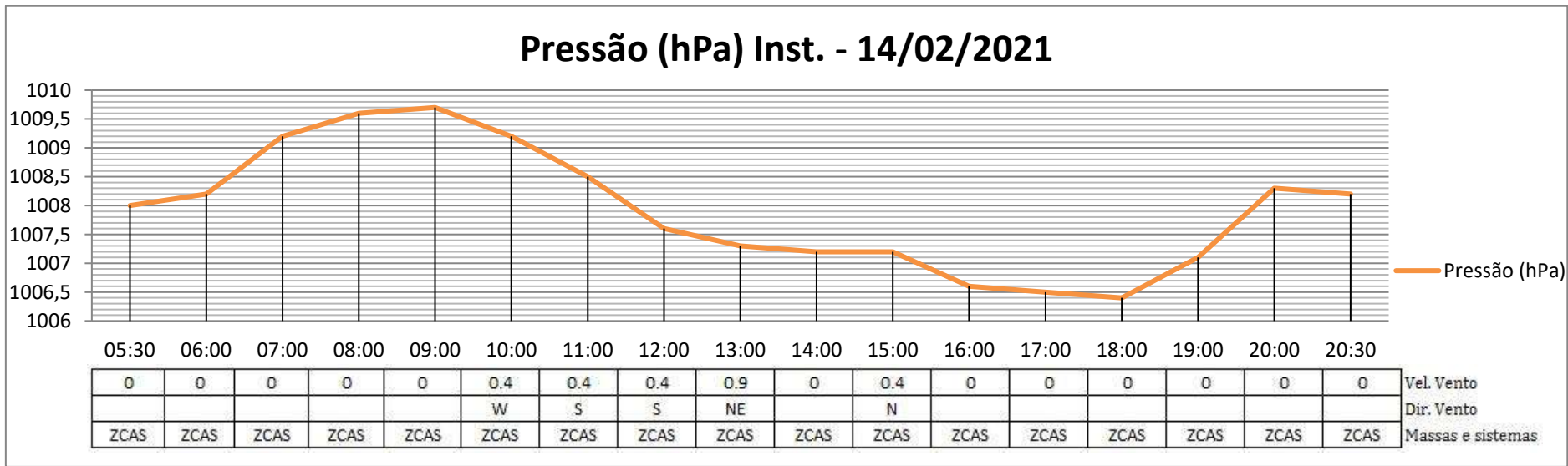
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 37 – Chuva horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.



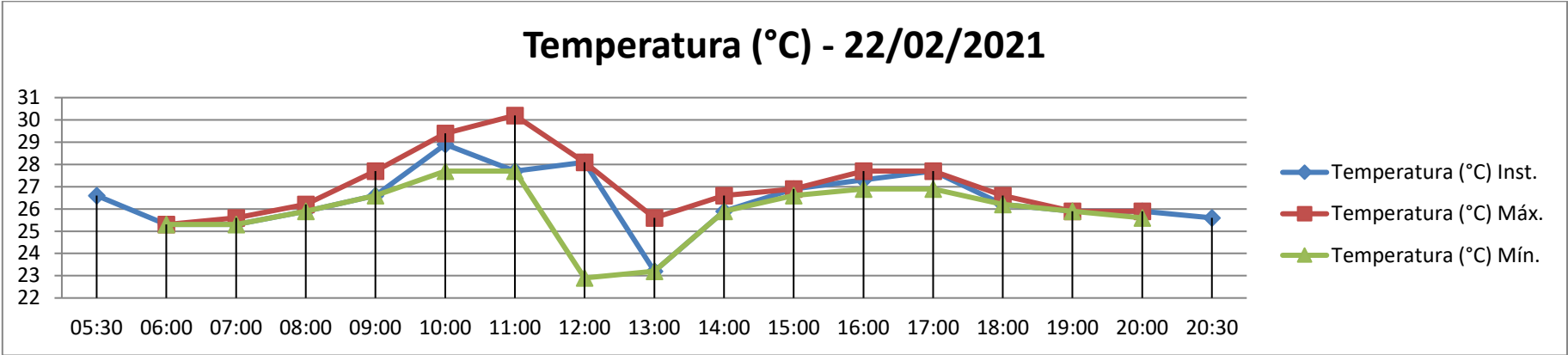
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 38 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 14/02/2021.



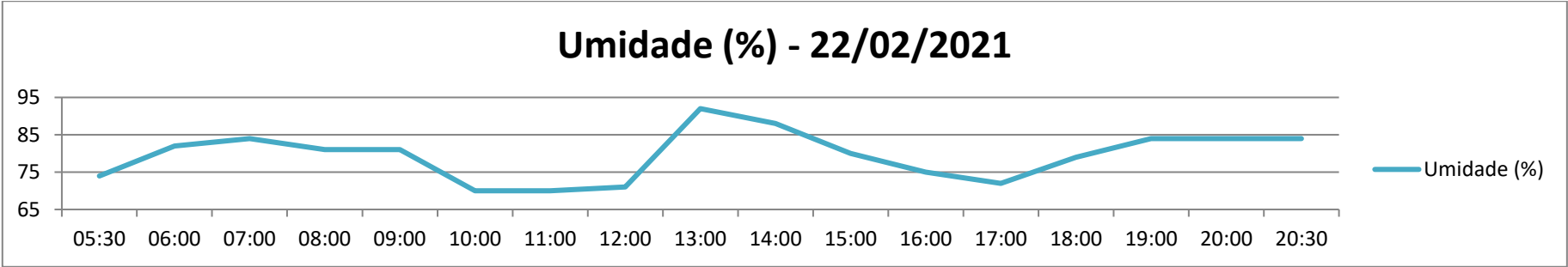
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 39 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.



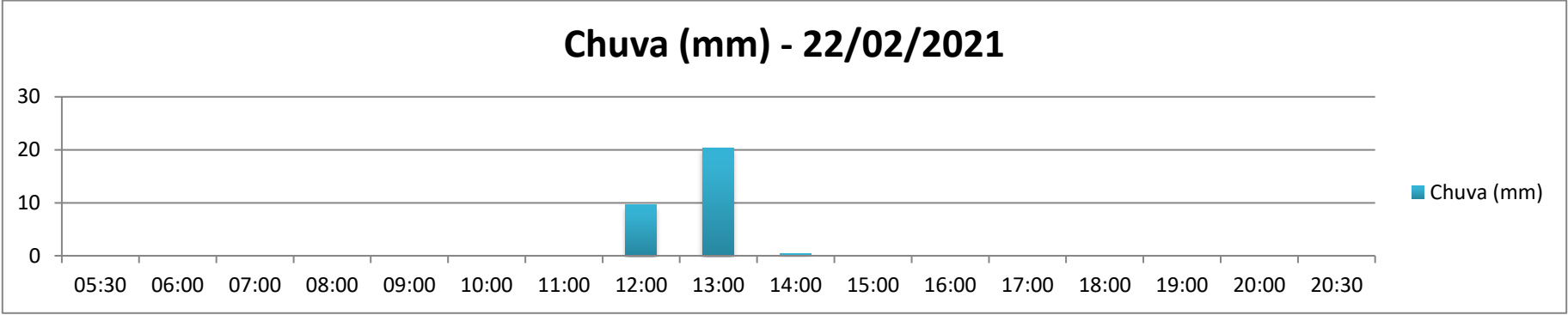
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 40 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.



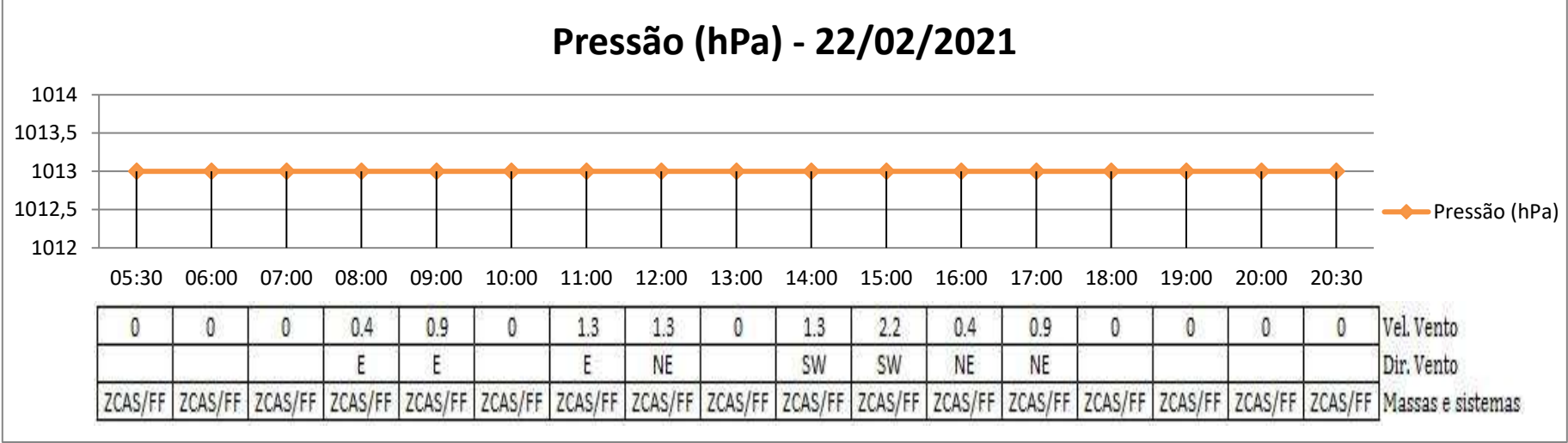
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 41 – Chuva horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.



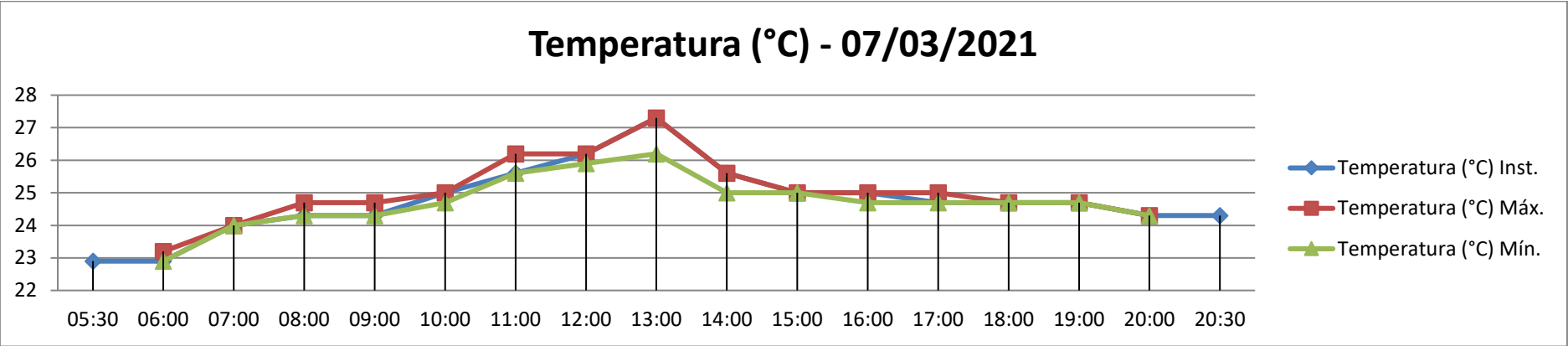
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 42 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 22/02/2021.



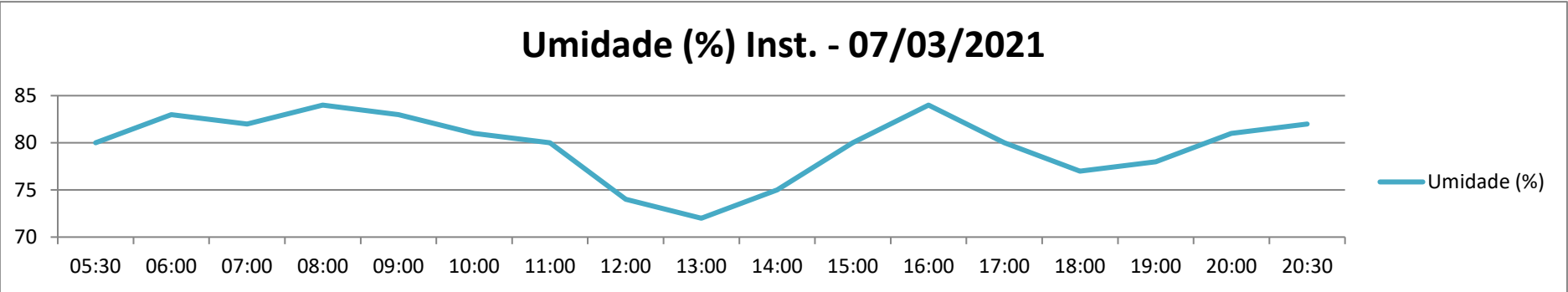
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 43 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.



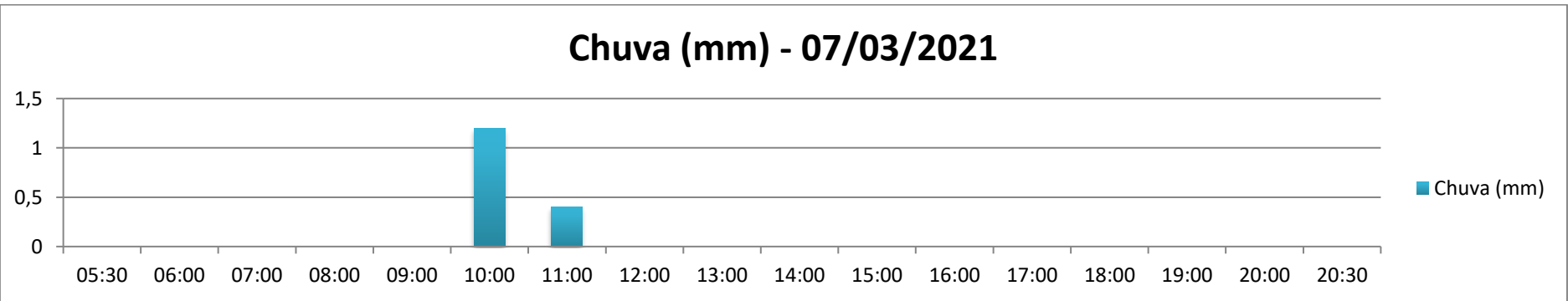
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 44 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.



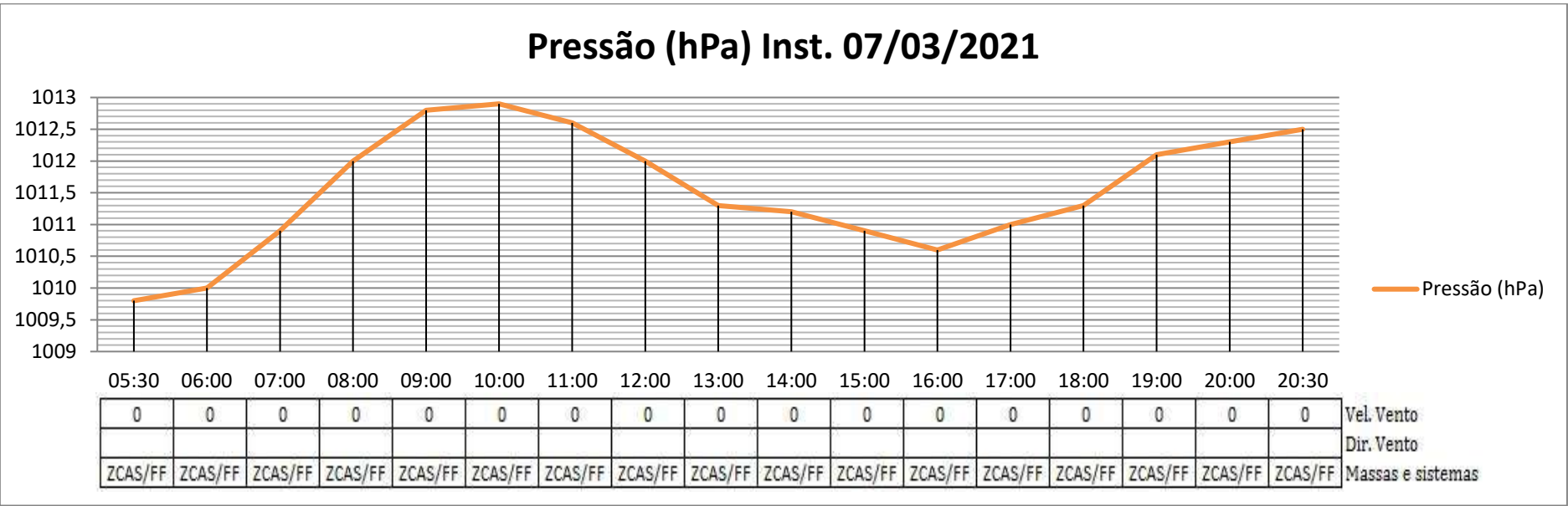
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 45 – Chuva horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.



Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 46– Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 07/03/2021.



Fonte: A autora, 2021.

4.4.2.2 Configuração térmica horizontal e vertical em situação de instabilidade

Em linhas gerais, mesmo sob condições consideradas distantes do ótimo de observação, tendo em vista que os sistemas produtores de instabilidade no nível regional acabam por sobrepor as respostas microclimáticas, foi possível identificar para os dias supracitados (14/02, 22/02 e 07/03) a configuração de ilhas de calor que se expressaram durante a manhã e a noite de até moderada magnitude (2°C a 4°C) e à tarde de até forte magnitude ($4,1^{\circ}\text{C}$ a 6°C) (Figuras 41, 42 e 43).

Essas intensidades estavam relacionadas não somente às condições microclimáticas da morfologia urbana, mas também às condições de nebulosidade. Isso pôde ser observado na medida em que a análise dos dados indicou que os pontos quentes do transecto 1 (Obelisco da Avenida Rio Branco e Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor) e do transecto 2 (Praça Mauá e Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas) continuaram a ser os mesmos. Contudo, as magnitudes foram mais significativas quando sob condição de céu encoberto em detrimento de céu parcialmente encoberto e aberto. Isso é explicado pelo fato de que as nuvens ajudam a regular o balanço de energia e, neste caso, a presença de nebulosidade está associada à retenção da irradiação (INPE, 2013).

Consequentemente, observou-se no transecto 1, às 6, 13 e 20 horas, um perfil temporo-espacial do campo térmico onde os extremos, ou seja, o Obelisco da Avenida Rio Branco (ponto 1) e a Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (ponto 4) apresentaram, predominantemente, as maiores medidas de diferenças em relação a estação de controle. Além da cobertura do céu, contribuíram para a atenuação da temperatura do ar na Fundação Biblioteca Nacional (ponto 2) e na Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha a presença de árvores (efeito bioclimático) e cruzamentos com logradouros de larguras consideráveis, respectivamente. Tanto o Obelisco quanto Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor, mantiveram seus horários de core, isto é, o ponto 1 no período matutino/vespertino e o ponto 4 no período noturno.

Considerando os três dias de experimento de campo, o transecto 1 apresentou ilhas de calor de até moderada magnitude ($2,1^{\circ}\text{C}$ a 4°C). Contudo, houve o predomínio da ilha de fraca intensidade ($0,1^{\circ}\text{C}$ a 2°C). As poucas ilhas mais frescas que foram configuradas durante os experimentos ficaram restritas aos seus

pontos, a saber: Fundação Biblioteca Nacional, Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha e Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (14/02) e Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha e Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (07/03). Comparado ao enquadramento sinótico de estabilidade, a ilha de frescor fez-se mais presente sob as condições de instabilidade.

No transecto 2, a intensidade da ilha de calor manteve-se da Praça Mauá até a Presidente Vargas, de maneira crescente pela manhã e à noite e de maneira decrescente pela tarde. Razão pelo qual a Praça Mauá seguiu apresentando as cores vespertinas e a Avenida Rio Branco/Presidente Vargas seguiu configurando cores matutina e noturna. Foi no transecto 2 que se configuraram as ilhas de calor de até forte magnitude ($4,1^{\circ}\text{C}$ a 6°C), contudo foram as ilhas de fraca intensidade ($0,1$ a 2°C) que se destacaram.

Especificamente, no dia 14/02, as cores horárias das ilhas estiveram presentes no transecto 1 e 2, respectivamente: às 6:00, no Obelisco da Avenida Rio Branco ($3,0^{\circ}\text{C}$) e Rio Branco/Avenida Presidente Vargas ($2,1^{\circ}\text{C}$); às 13:00, no Obelisco da Avenida Rio Branco ($0,2^{\circ}\text{C}$) e Praça Mauá ($2,6^{\circ}\text{C}$); e 20:00, no Obelisco da Avenida Rio Branco ($2,0^{\circ}\text{C}$) e Avenida Presidente Vargas ($2,3^{\circ}\text{C}$).

Já no dia 22/02, a Avenida Rio Branco/Ouvidor, do transecto 1, projetou-se como core nos três horários, com as seguintes intensidades: $1,1^{\circ}\text{C}$ (6:00), $3,7^{\circ}\text{C}$ (13:00) e $1,0^{\circ}\text{C}$ (20:00). Enquanto no transecto 2, as medidas de diferenças máximas estiveram associadas à Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas (1°C) às 06:00, à Praça Mauá ($4,2^{\circ}\text{C}$) às 13:00 e Avenida Rio Branco/Visconde de Inhauma ($0,7^{\circ}\text{C}$) às 20:00. Neste dia, devido ao elevado volume pluviométrico (total de 40 mm) que caiu sobre o *Central Business District*, entre às 12 e 13 horas, o transecto necessitou ser realizado às 13:30, quando a chuva cessou. Percebe-se que logo após a chuva, a intensidade da ilha de calor foi de moderada magnitude ($2,1^{\circ}\text{C}$ a 4°C) no transecto 1, chegando até muito forte magnitude ($4,1$ a $6,0^{\circ}\text{C}$) no transecto 2. Isso também pode ser explicado pelo intenso fluxo de calor advindo da combustão dos automóveis, do metabolismo dos transeuntes e dos aparelhos condicionadores ligados, ao longo da Avenida Rio Branco, tendo em vista que 22/02 compreende uma segunda-feira.

Finalmente no dia 07/03, para o transecto 1, as cores foram identificadas às 06 horas na Fundação Biblioteca Nacional ($2,3^{\circ}\text{C}$) e às 13 e 20 horas no Obelisco da Avenida Rio Branco com as intensidades, respectivas, de $3,0^{\circ}\text{C}$ e $1,7^{\circ}\text{C}$. Em relação

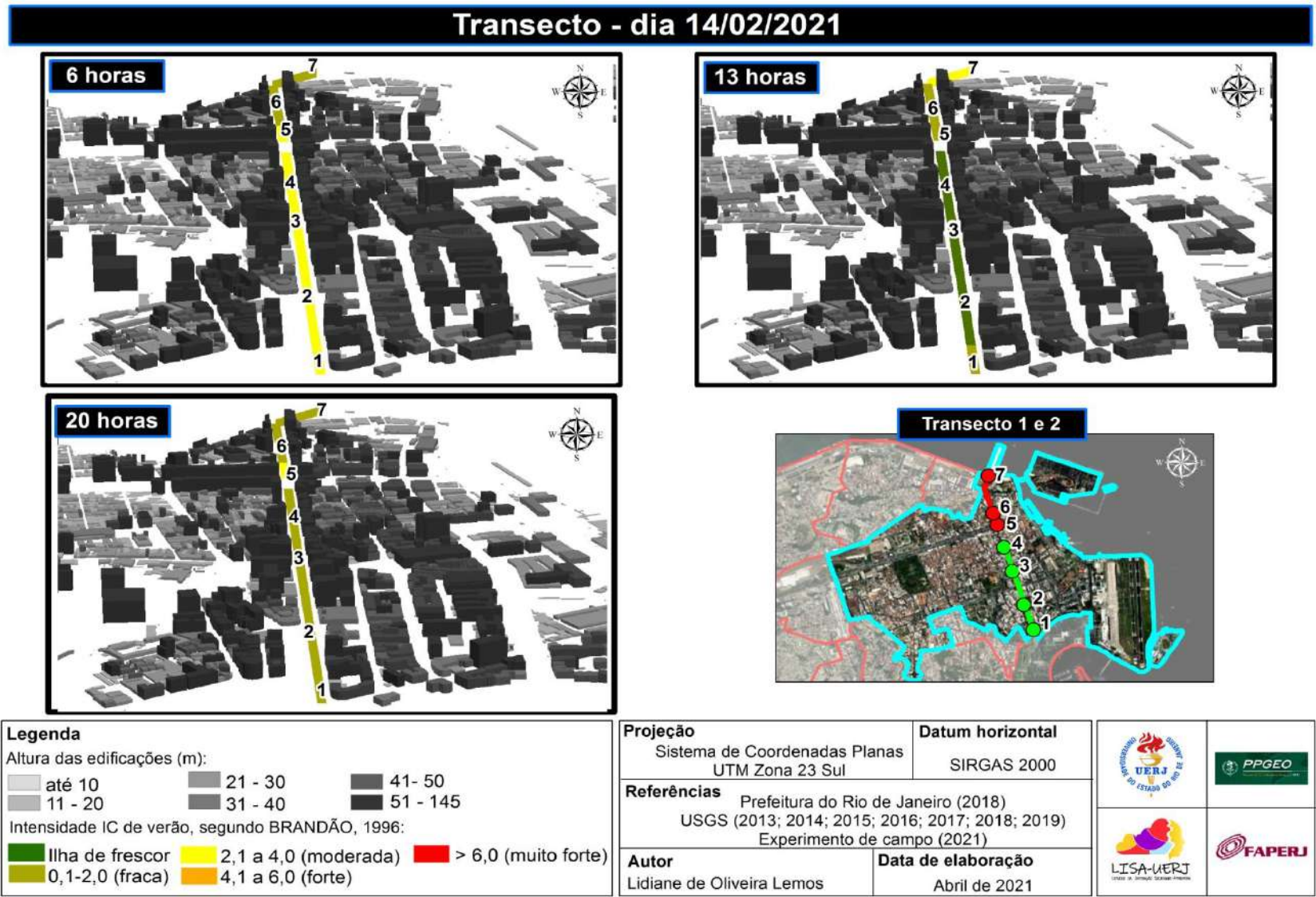
ao transecto 2, com exceção da Avenida Rio Branco/Visconde de Inhaúma (ponto 6) que registrou a core horária das 13 horas com intensidade de $3,8^{\circ}\text{C}$, a Avenida Presidente Vargas compreendeu a intensidade máxima das ilhas de calor, com $2,9^{\circ}\text{C}$, às 06 horas, e com $1,5^{\circ}\text{C}$, às 20:00.

A taxa de aquecimento registrada, durante a situação de instabilidade, confirmou a Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor e a Praça Mauá como os pontos de maior capacidade de ganho de energia, ao longo de um dia. Por outro lado, esta situação de instabilidade, cujas condições sinóticas associaram-se à morfologia urbana na magnitude da ilha de calor, a Avenida Rio Branco/Nilo Peçanha apresentaram a menor eficiência do armazenamento de calor. Muito provável que seus cruzamentos largos tenham contribuído no processo (Gráficos 47, 48 e 49).

Em relação à investigação do perfil termo-higrométrico vertical, ocorrido no dia 07/03 no Largo da Carioca, as temperaturas foram, em geral, inferiores a da situação de estabilidade. O gradiente térmico entre as diferentes altitudes manteve-se pequeno. As diferenças das temperaturas matutinas foram de $0,9^{\circ}\text{C}$, vespertinas de $2,1^{\circ}\text{C}$ e noturna de $0,2^{\circ}\text{C}$ (Gráficos 50, 51 e 52). Assim sendo, sob a condição de instabilidade, novamente verifica-se maior gradiente vertical às 13 horas. Horário também das menores umidades relativas do ar.

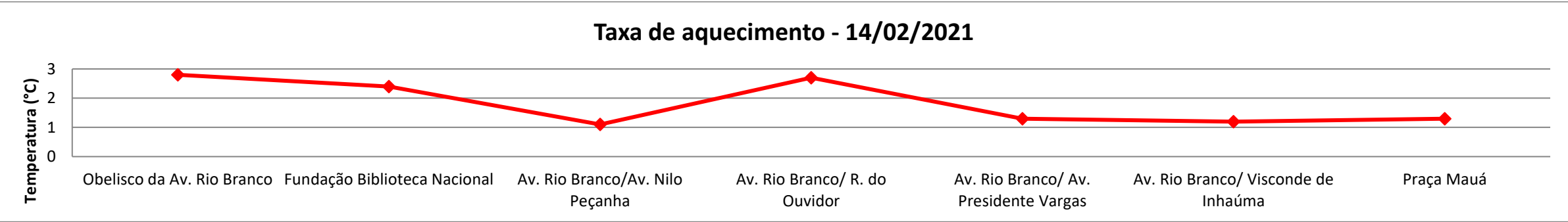
No dia 07/03, pela manhã, a variação vertical da temperatura decresceu do chão ($24,8^{\circ}\text{C}$) até 50 metros ($23,9^{\circ}\text{C}$). Às 13 e 20 horas foram identificados indícios do fenômeno de inversão térmica, pois a variação das temperaturas encontradas estavam dentro da dimensão do valor de erro do *datalogger*. Ambos as tendências aconteceram persistindo até altitude de 40 metros. Enquanto à tarde, a temperatura observada no chão foi de $31,6^{\circ}\text{C}$, em 40 metros, a temperatura foi de $31,8^{\circ}\text{C}$. Já à noite, o registro térmico, em 40 metros, foi superior a encontrada do ar próximo ao chão em $0,2^{\circ}\text{C}$ (Gráficos 50, 51, 52, 53, 54 e 55).

Figura 41 - Campo térmico no dia 14/02/2021.



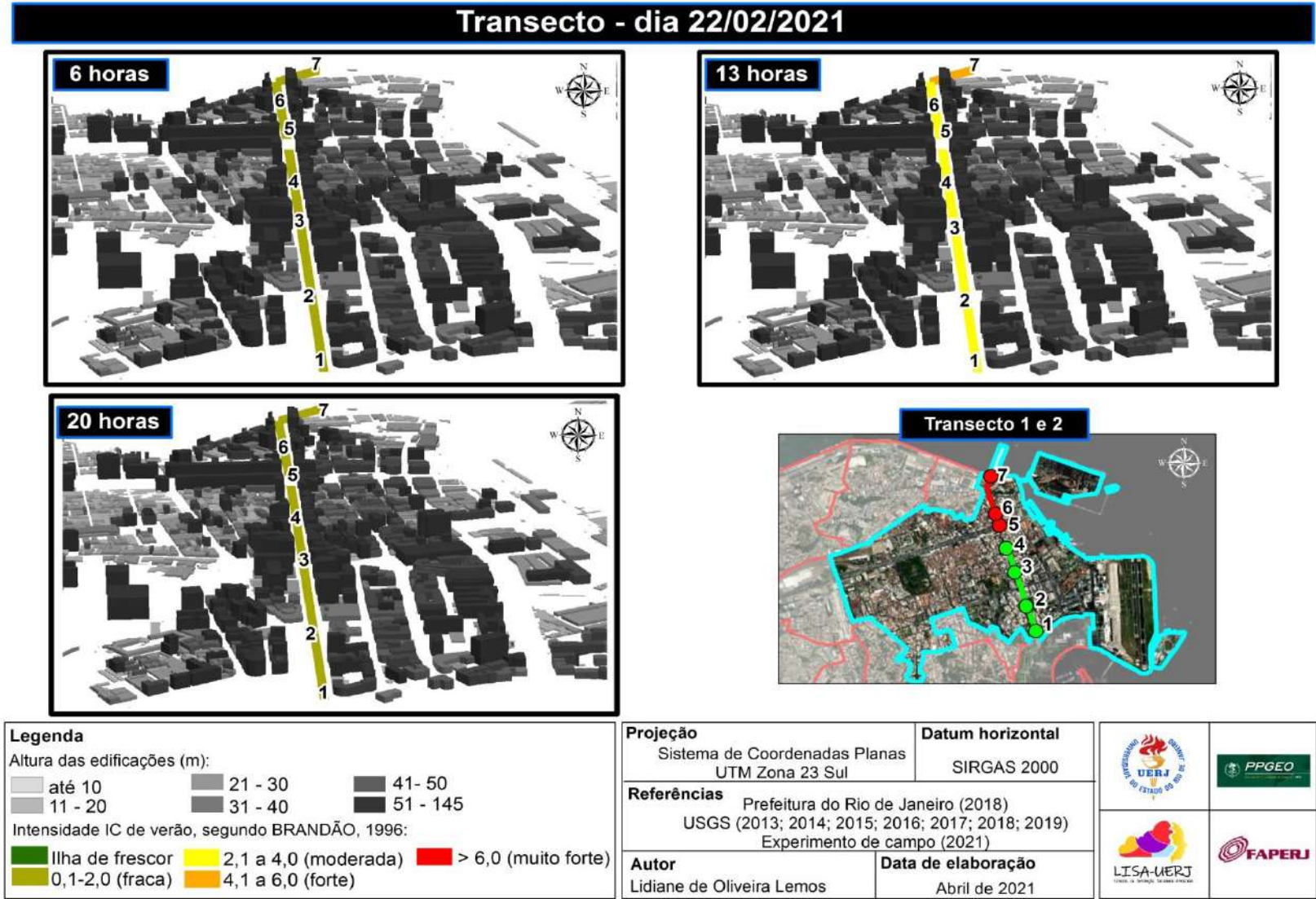
Fonte: A autora (2021); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018). Elaborado pela autora, 2021.

Gráfico 47 – Taxa de aquecimento no dia 14/02/2021.



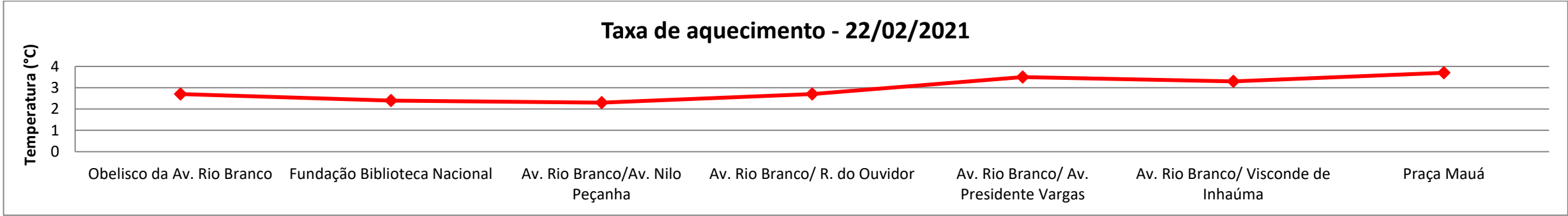
Fonte: A autora, 2021.

Figura 42 - Campo térmico no dia 22/02/2021.



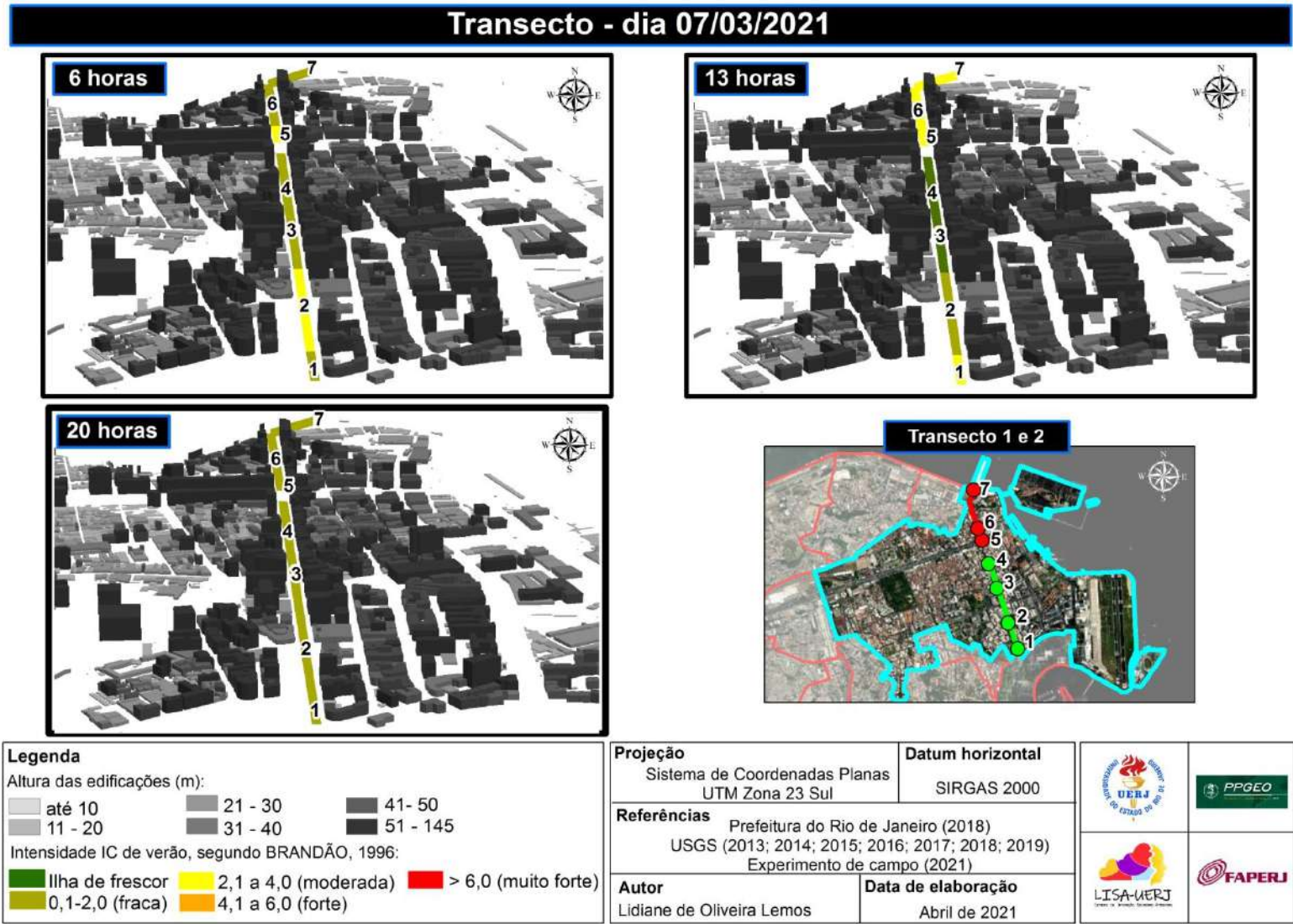
Fonte: A autora (2021); Prefeitura do Rio de Janeiro (2018). Elaborado pela autora, 2021.

Gráfico 48 – Taxa de aquecimento no dia 22/02/2021.



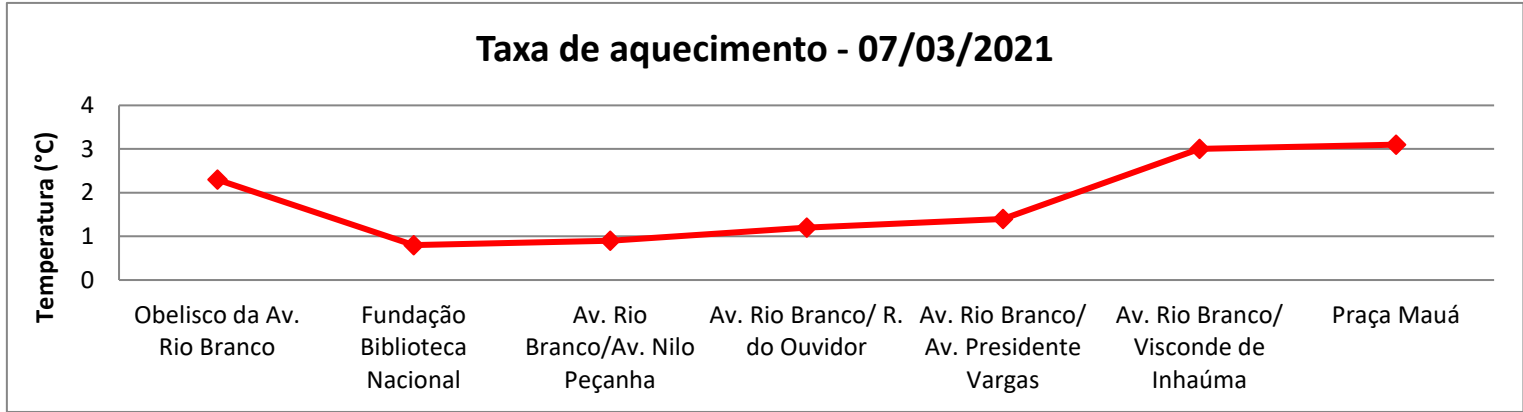
Fonte: A autora, 2021.

Figura 43 – Campo térmico no dia 07/03/2021.



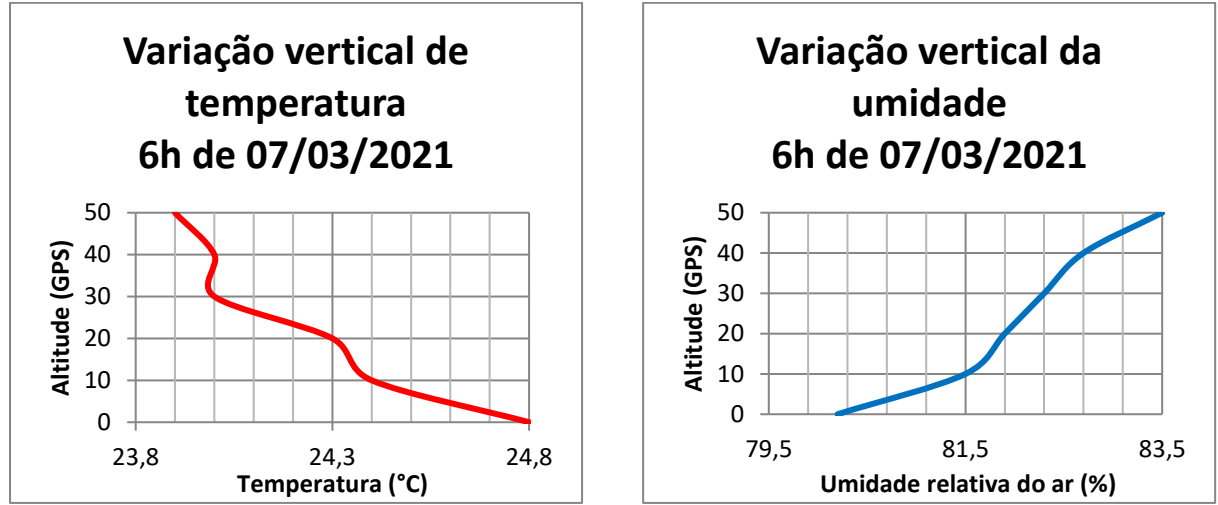
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 49 – Taxa de aquecimento no dia 07/03/2021.



Fonte: A autora (2021).

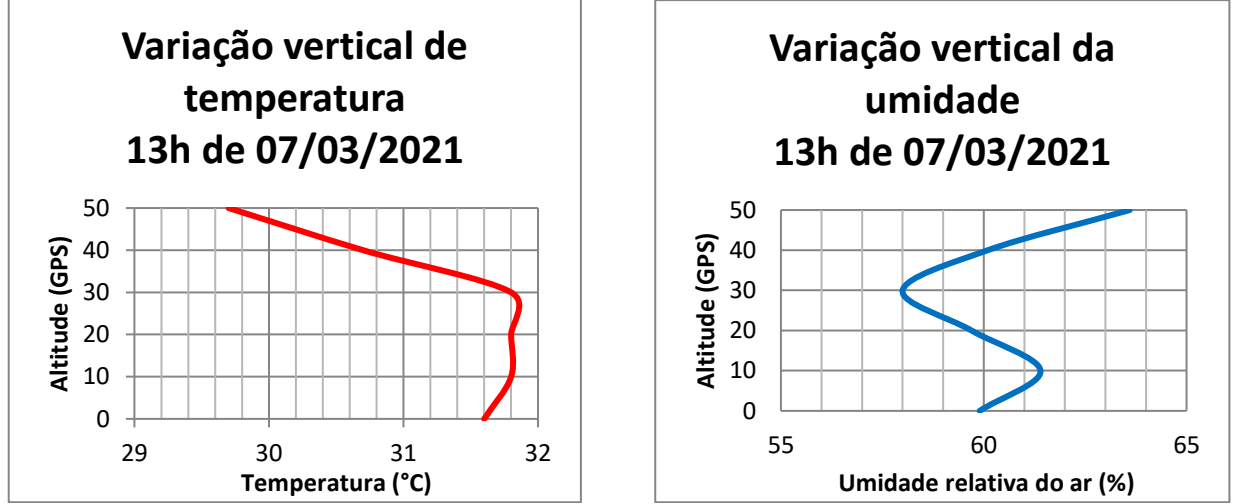
Gráfico 50 – Temperatura vertical às 6h no dia 07/03. Gráfico 53 – Umidade vertical às 6h no dia 07/03



Fonte: A autora (2021).

Fonte: A autora (2021).

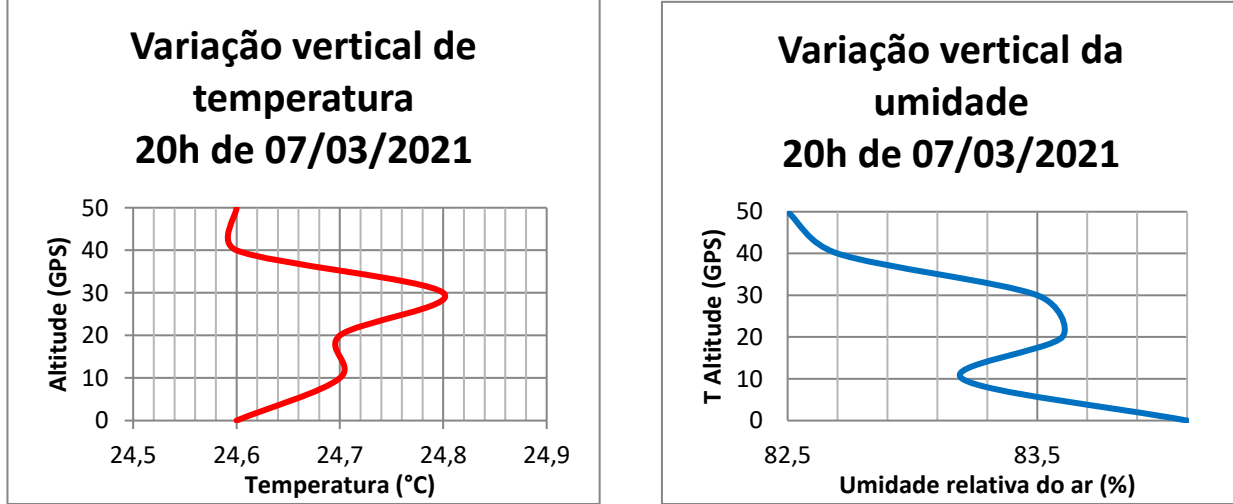
Gráfico 51 – Temperatura vertical às 13h no dia 07/03. Gráfico 54 – Umidade vertical às 13h no dia 7/03.



Fonte: A autora (2021).

Fonte: A autora (2021).

Gráfico 52 – Temperatura vertical às 20h no dia 07/03. Gráfico 55 – Umidade vertical às 20h no dia 7/03.



Fonte: A autora (2021).

Fonte: A autora (2021).

4.4.3 Campo térmico em situação de pós-instabilidade

Os dias 07/02 e 21/02 foram marcados pelo enfraquecimento dos sistemas regionais produtores de instabilidade atmosférica. A situação de tempo reinante foi condicionada pela repercussão enfraquecida da ZCAS (RZCAS), que embora tenha seguido pelo estado em direção à região noroeste do Rio de Janeiro, onde manteve atuação significativa, foi responsável pela formação de nuvens baixas. No caso do dia 07/02, além da Zona de Convergência do Atlântico Sul, ocorreu também a dissipação da frente estacionária, cuja formação foi favorecida pela célula de baixa pressão oceânica (ANEXO C).

Essa situação sinótica de pós-instabilidade pode ser identificada por meio de análises das cartas sinóticas, onde se percebe um relativo aumento de pressão, predominando na área de estudo a isóbara de 1014mb, e significativa diminuição da nebulosidade. Também os índices termodinâmicos existentes nas radiossondas expressam esse processo de transição.

Tabela 10 - Índices termodinâmicos em situação de pós- instabilidade.

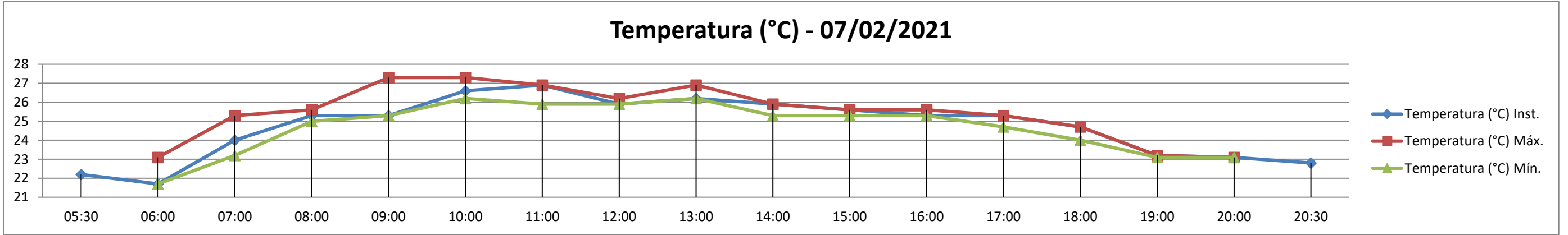
Índices termodinâmicos						
00 UTC				12 UTC		
Dia	K	TT	CAPE	K	TT	CAPE
07/fev	27	35	0	27	37	0
21/fev	32	41	295	31	41	413

Fonte: UNIFEI, 2021.

No que se refere à resposta local ao mecanismo de circulação atmosférica regional, em relação aos elementos atmosféricos da estação meteorológica do dia 07/02, assim foram observados: temperatura mínima de 21,7°C e máxima de 27,3°C; umidade relativa mínima de 64% e máxima de 87%. Em geral, nos horários em que as temperaturas registraram os maiores valores (entre as 08 e 16 horas) foram os que acusaram os menores valores de umidade relativa do ar. A pressão atmosférica permaneceu constante ao longo dia, com a isóbara identificada em 1011mb. Os ventos ocorreram, sobretudo, entre as 09 e 17 horas com direções leste, oeste e sudeste (Gráficos 56, 57 e 58).

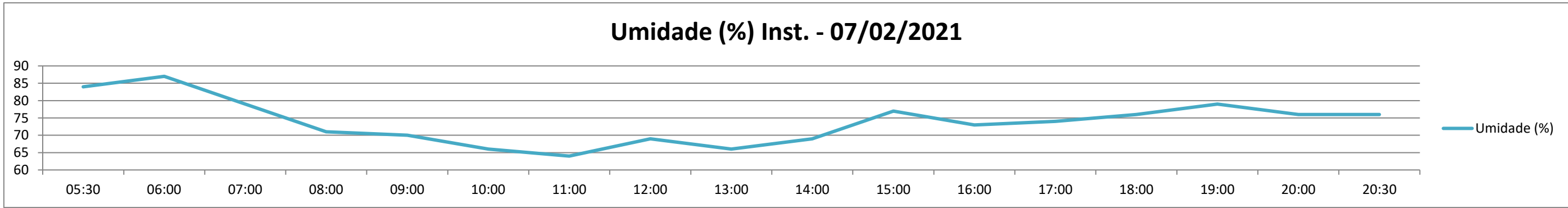
Já no dia 21/02, a temperatura máxima foi de 28°C e mínima de 25°C. O registro máximo de umidade foi de 86% e mínimo de 69%. No pico de umidade do ar, a pluviosidade observada foi de 2,4mm. Por fim, o comportamento isobárico oscilou, ao longo do dia, de 1012,2mb até 1014,5mb (Gráficos 59, 60, 61 e 62).

Gráfico 56 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 07/02/2021.



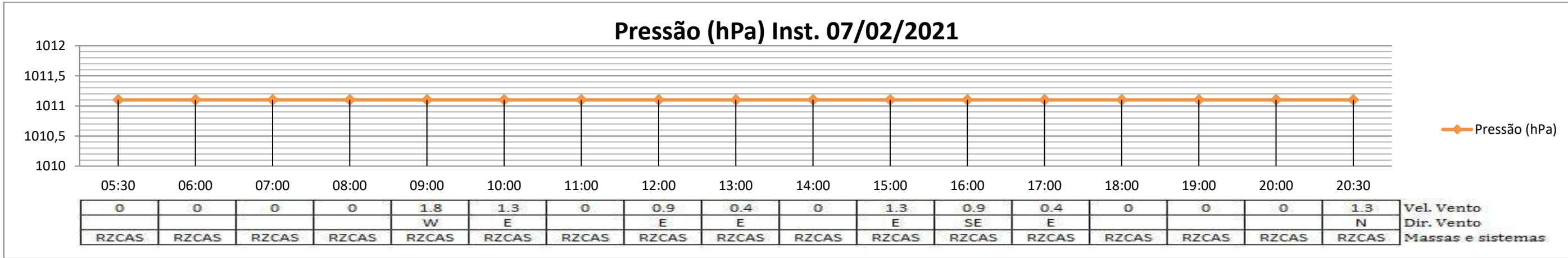
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 57 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 07/02/2021.



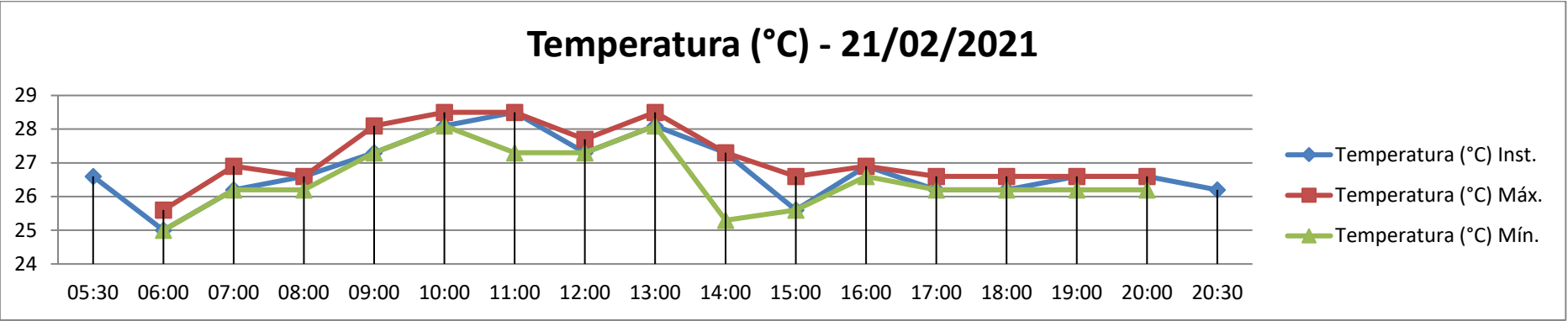
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 58 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 07/02/2021.



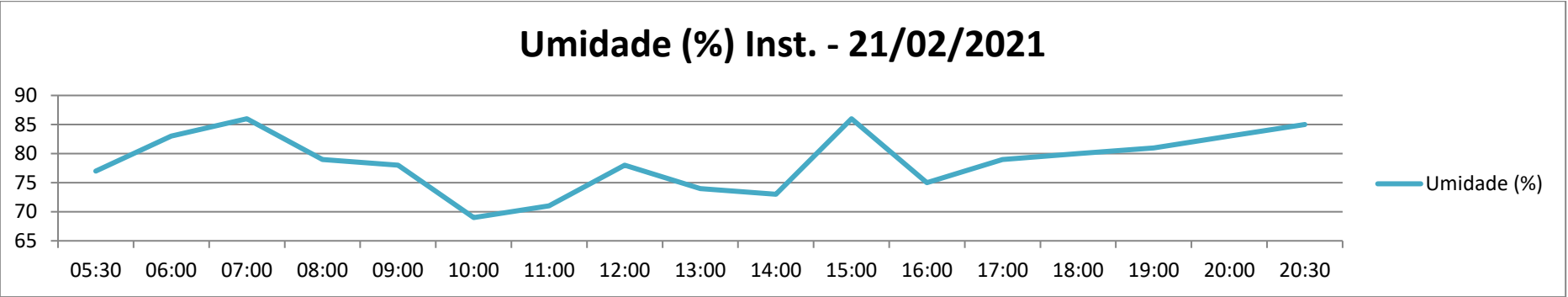
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 59 - Temperatura horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.



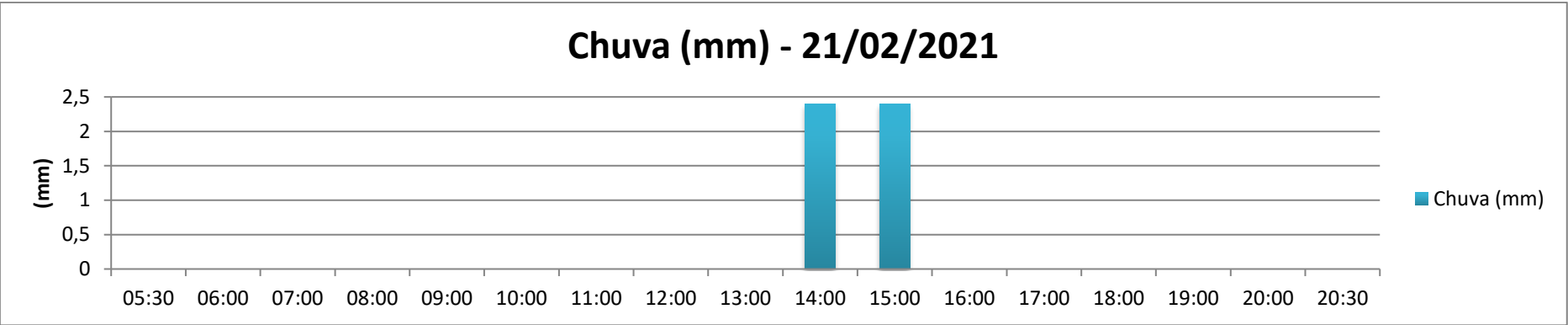
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 60 – Umidade relativa do ar horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.



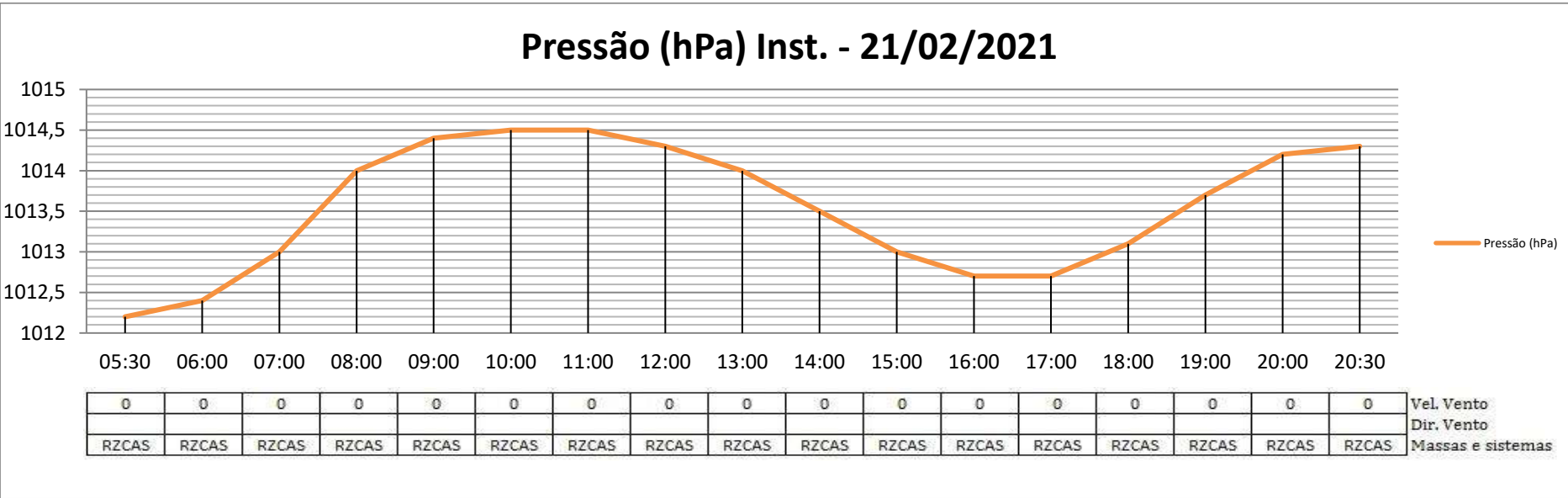
Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 61 – Chuva horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.



Fonte: A autora, 2021.

Gráfico 62 – Pressão atmosférica horária da estação meteorológica no dia 21/02/2021.



Fonte: A autora, 2021.

4.4.3.1 Configuração térmica horizontal e vertical em situação de pós-instabilidade

O enquadramento sinótico de situação de pós-instabilidade (marcado pelo enfraquecimento da ZCAS), dos dias 07/02 e 21/02, foi responsável por possibilitar à configuração de ilhas de calor que variaram de fraca ($0,1^{\circ}\text{C}$ a 2°C) a moderada intensidade ($2,1^{\circ}\text{C}$ a 4°C) (Figuras 44 e 45). Isto é, magnitudes inferiores se comparado aos padrões anteriores de estabilidade e instabilidade atmosférica.

Considerando os dois dias de experimento de campo, os transecto 1 e 2 apresentaram ilhas matutinas e noturnas de até moderada magnitude ($2,1^{\circ}\text{C}$ a 4°C), contudo predominaram as ilhas de calor de fraca intensidade ($0,1^{\circ}\text{C}$ a 2°C). Em geral, foi possível identificar que as cores máximas novamente estão associadas às ilhas vespertinas (13 horas). As poucas ilhas frias que foram configuradas ficaram restritas ao transecto 2 nos seguintes pontos: Praça Mauá (ponto 7) e Avenida Rio Branco/Visconde de Inhaúma (ponto 6), no dia 07/02 às 6 horas, e Praça Mauá (ponto 7), Av. Rio Branco/Visconde de Inhaúma (ponto 6) e Avenida Rio Branco/Avenida (ponto 5), no dia 21/02 às 20 horas.

Esse mapeamento da configuração térmico confirmou a persistência, no transecto 1, do Obelisco da Avenida Rio Branco e da Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor como os núcleos térmicos de maiores intensidades. Da mesma forma que, no transecto 2, a Praça Mauá e a Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas.

Diferentemente da situação de estabilidade e de instabilidade atmosférica, não foi possível observar durante a situação de pós-instabilidade um comportamento espacial-temporal marcante de mobilidade da ilha de calor. Isso pode estar relacionado à característica de transição da atmosfera, que por natureza se expressa por uma situação perturbada.

Especificamente, no dia 07/02, as cores horárias, no transecto 1 e 2, respectivamente, estiveram associados às 6:00, ao Obelisco da Avenida Rio Branco ($2,1^{\circ}\text{C}$) e Rio Branco/Avenida Presidente Vargas ($3,3^{\circ}\text{C}$); às 13:00, Avenida Rio Branco/Nilo Peçanha (3°C) e Praça Mauá ($2,6^{\circ}\text{C}$); às 20:00, no Obelisco da Avenida Rio Branco ($1,6^{\circ}\text{C}$) e Praça Mauá ($1,3^{\circ}\text{C}$).

Já o dia 21/02, o transecto 1 apresentou cores de $1,6^{\circ}\text{C}$ e $0,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, às 6:00 e 20:00, na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor e às 13:00, de $2,1^{\circ}\text{C}$, na Fundação Biblioteca Nacional. Finalmente o transecto 2, as ilhas

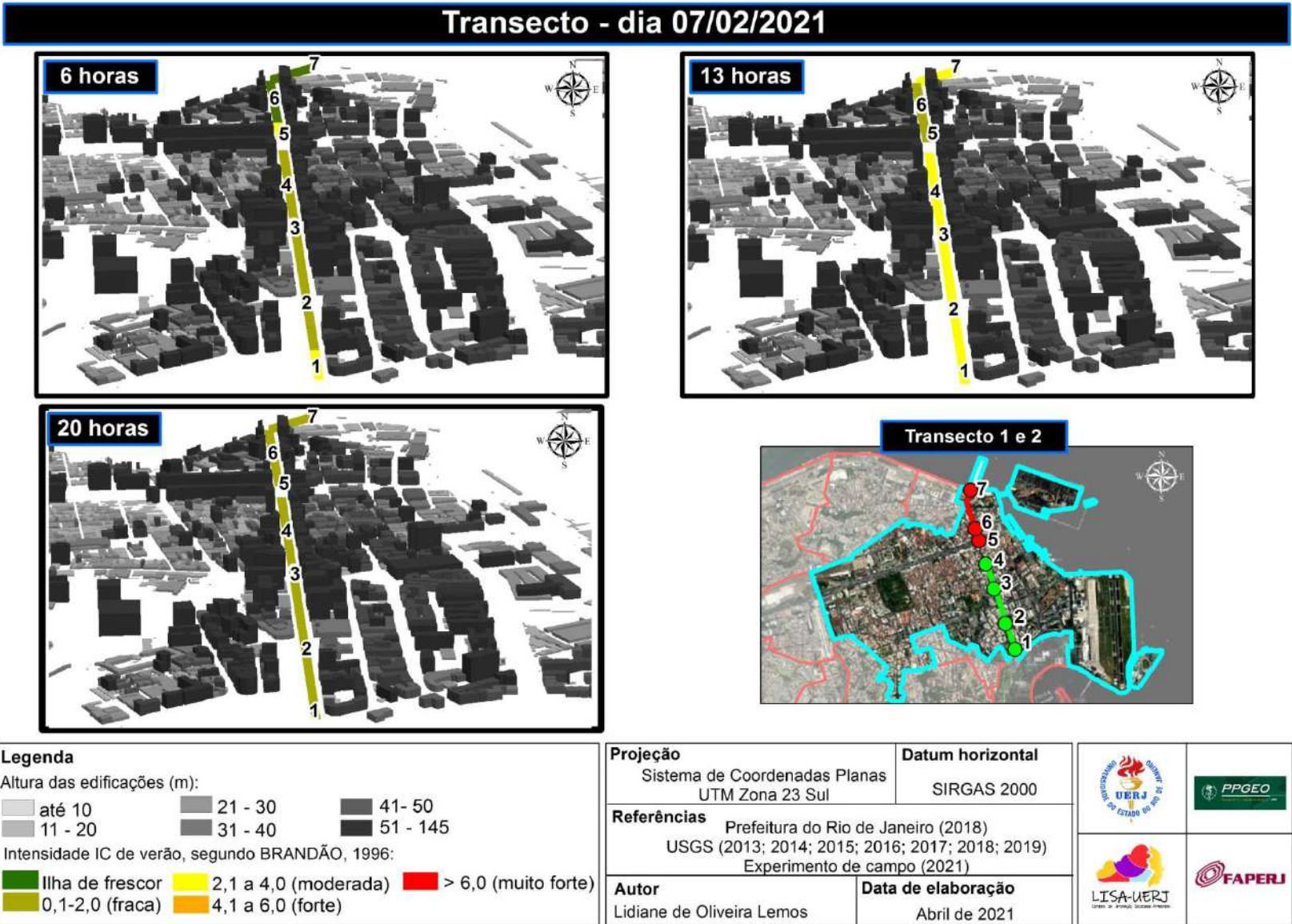
presente às 6:00 e às 13:00, manifestaram-se, respectivamente, com intensidade de 1,6° na Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas e 1,9°C na Praça Mauá.

No que se refere à taxa de aquecimento dos pontos, não houve convergência, de maneira geral, em relação aos conhecimentos anteriores e, inclusive, entre os dias 07/02 e 22/02. Enquanto o dia 07/02 identificou a Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha e Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas como os pontos de maior eficiência de armazenamento de energia, o dia 22 registrou a Avenida Rio Branco/Fundação Biblioteca Nacional, Avenida Rio Branco/Visconde Inhaúma e Praça Mauá. Esses resultados demarcam, novamente, uma possível consequência de uma situação típica de transição atmosférica (Gráficos 63 e 70).

Em relação à investigação do perfil vertical de temperatura do ar e umidade relativa, houve coleta tanto no dia 07/02 quanto no dia 21/02. No dia 07/02, durante todo o experimento de campo, o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar, manifestou-se da maneira esperada quando se considera a elevação da altitude, ou seja, os valores de temperatura decresceram, enquanto a umidade relativa elevou-se. Assim, de manhã, o chão e a altura máxima registraram, respectivamente, 23,2°C e 22,8°C; à tarde, 29,2°C e 28,4°C e a noite, 23,4°C e 22,9°C. As coletas matutinas indicaram uma diferença térmica entre as posições altimétricas de 0,4°C, à tarde de 0,8°C e a noite de 0,6°C (Gráficos 64, 65, 66, 67, 68 e 69).

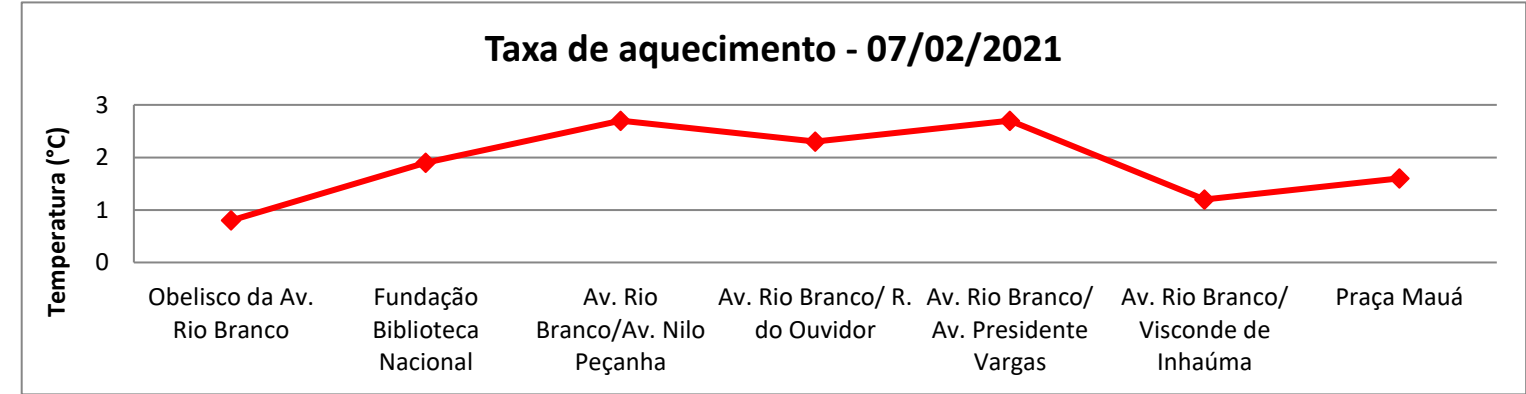
Por fim, o dia 21/02 é caracterizado, no horário matutino, com indícios de inversão térmica. A temperatura que vinha decrescendo conforme a elevação da altitude até 40 metros (25,9°C) elevou-se em 50 metros para 26°C. As variações entre os registros verticais não ultrapassaram 0,6°C. À tarde, o ar próximo ao chão registrou 31,7°C, enquanto o ar em 50 metros marcou 30,7°C. Já à noite, de forma similar, a temperatura decresceu de 27°C (chão) a 26,3°C (50 metros) (Gráficos 71, 72, 73, 74, 75 e 76).

Figura 44 – Campo térmico no dia 07/02/2021.



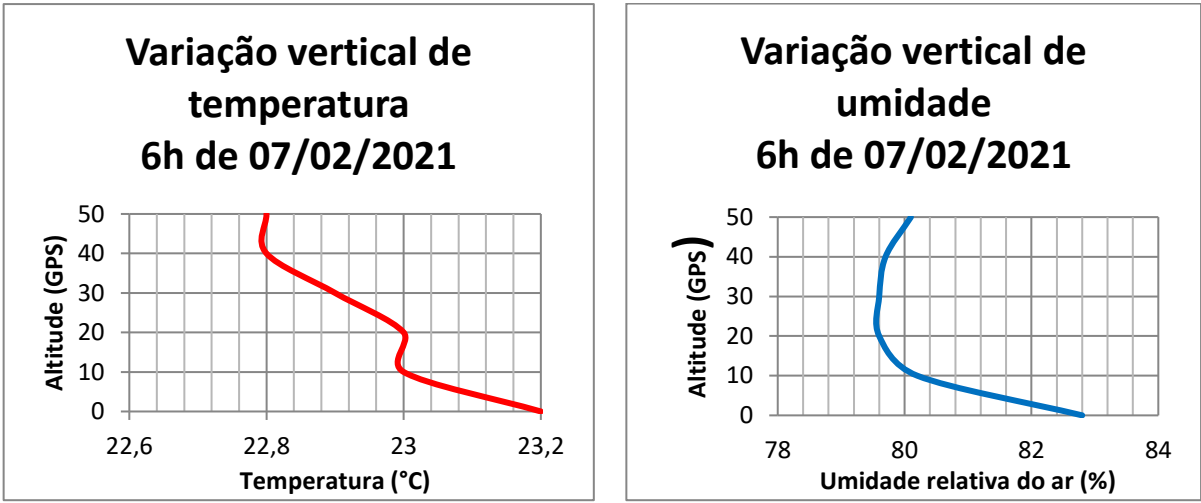
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 63 – Taxa de aquecimento no dia 07/02/2021.



Fonte: A autora (2021).

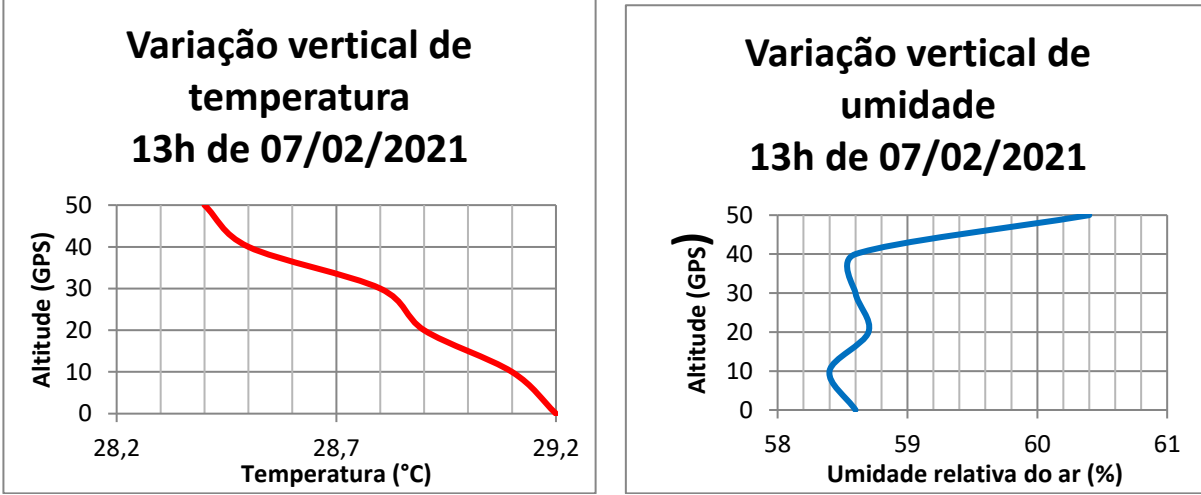
Gráfico 64 – Temperatura vertical às 6h no dia 07/02. Gráfico 67 – Umidade vertical às 6h no dia 07/02.



Fonte: A autora (2021).

Fonte: A autora (2021).

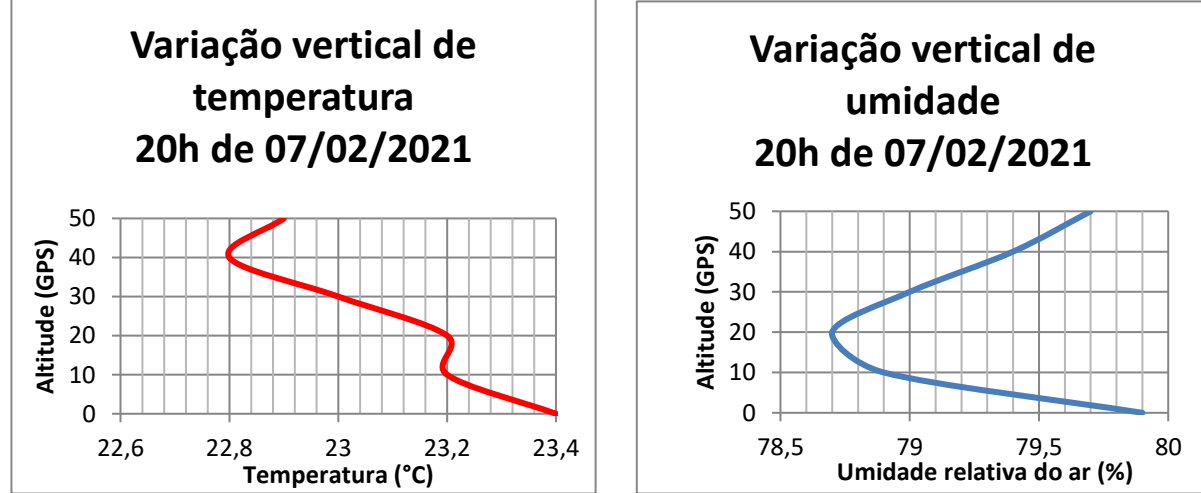
Gráfico 65 – Temperatura vertical às 13h no dia 7/02. Gráfico 68 – Umidade vertical às 13h no dia 7/02.



Fonte: A autora (2021).

Fonte: A autora (2021).

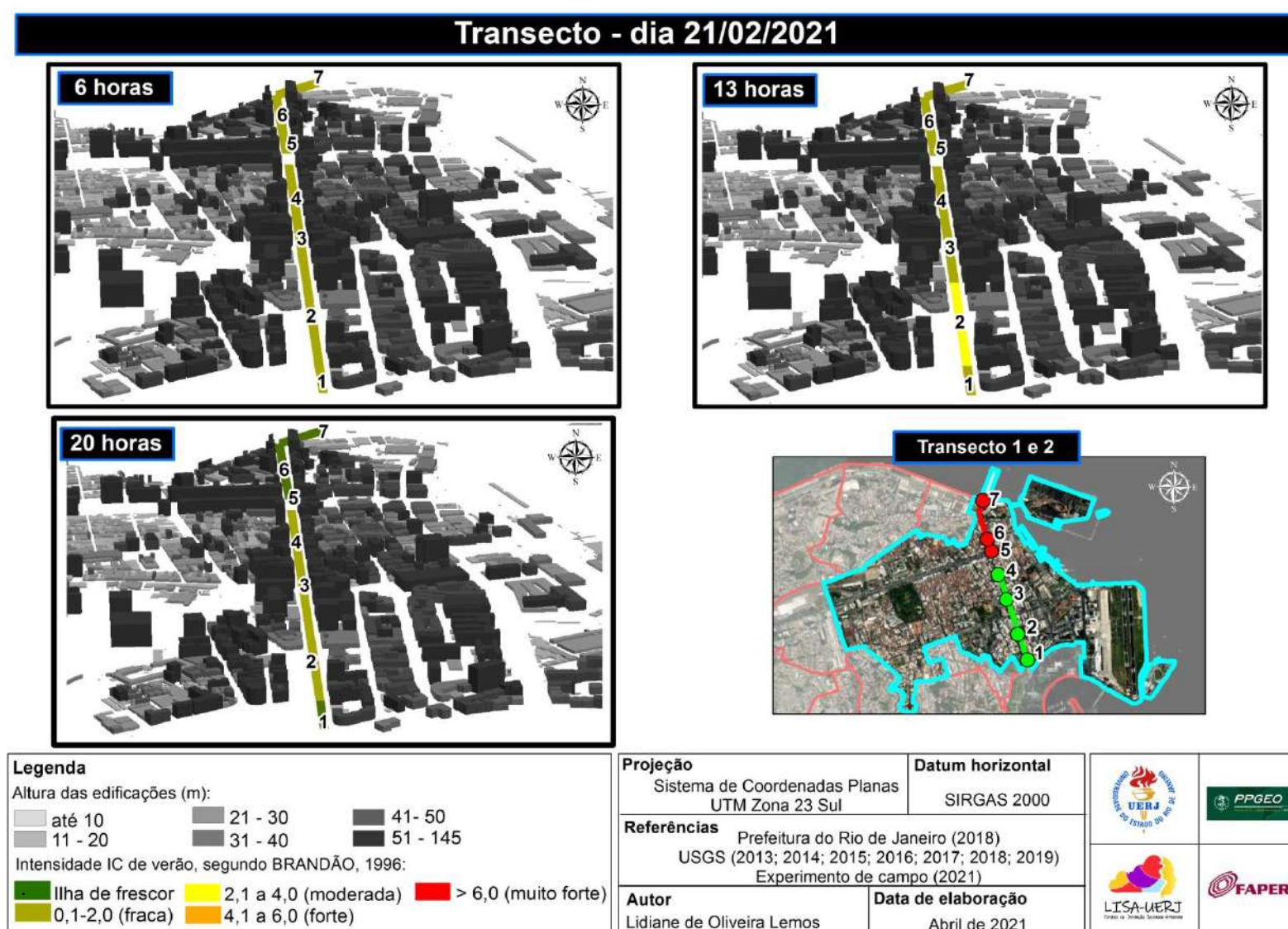
Gráfico 66 – Temperatura vertical às 20h no dia 7/02. Gráfico 69 – Umidade vertical às 20h no dia 7/02.



Fonte: A autora (2021).

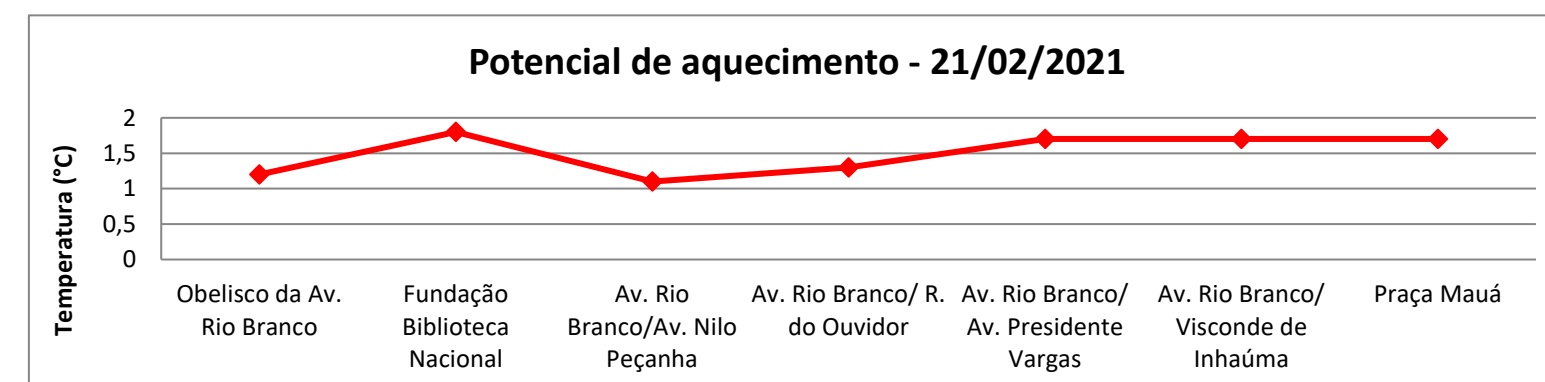
Fonte: A autora (2021).

Figura 45 – Campo térmico no dia 21/02/2021.



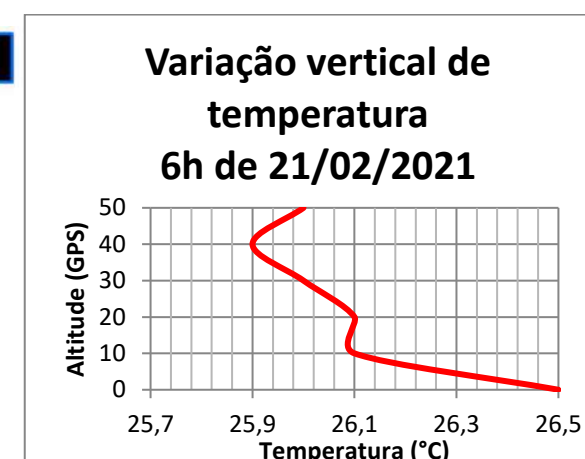
Fonte: A autora (2021).

Gráfico 70 – Taxa de aquecimento no dia 21/02/2021.

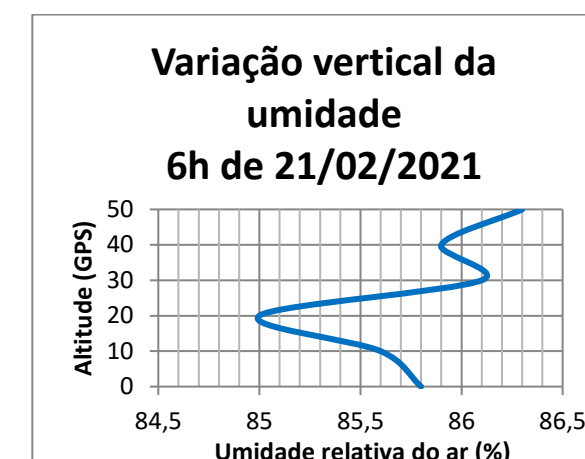


Fonte: A autora (2021).

Gráfico 71 – Temperatura vertical às 6h no dia 21/02. Gráfico 74 – Umidade vertical às 6h no dia 21/02.

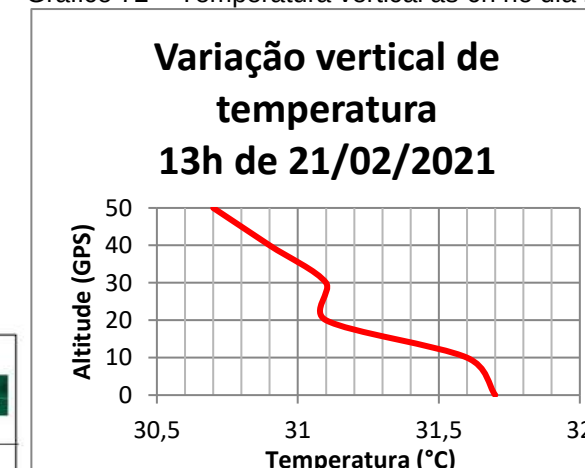


Fonte: A autora (2021).

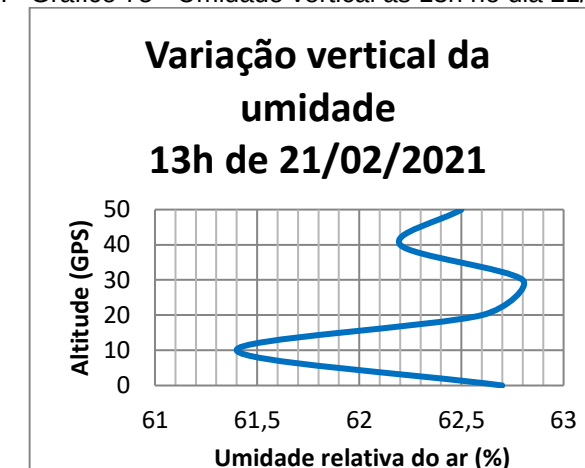


Fonte: A autora (2021).

Gráfico 72 – Temperatura vertical às 6h no dia 21/2. Gráfico 75 - Umidade vertical às 13h no dia 21/02.

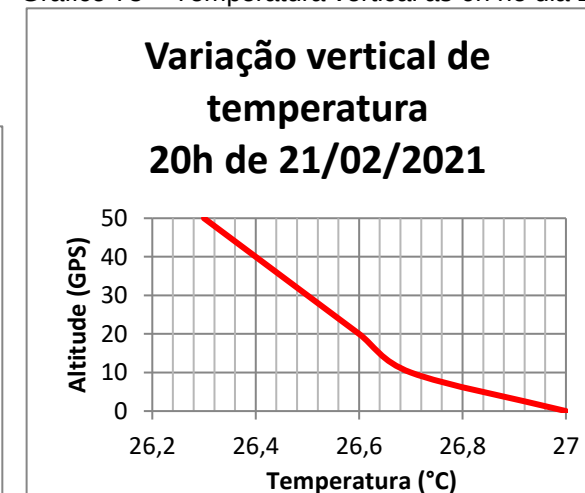


Fonte: A autora (2021).

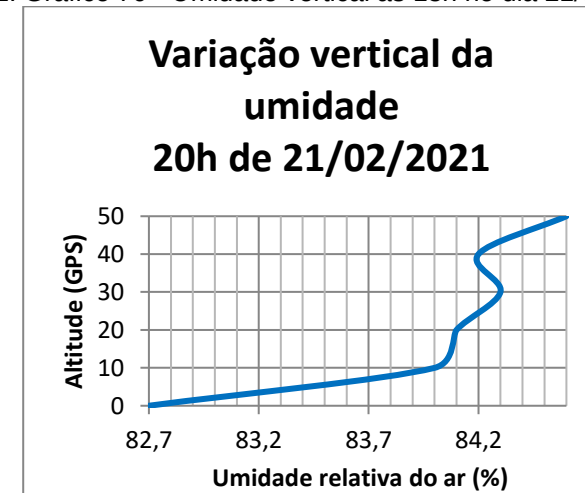


Fonte: A autora (2021).

Gráfico 73 – Temperatura vertical às 6h no dia 21/02. Gráfico 76 - Umidade vertical às 13h no dia 21/02.



Fonte: A autora (2021).



Fonte: A autora (2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa intitulada *Configuração térmica horizontal e vertical do clima urbano do Central Business District (CBD) da cidade do Rio de Janeiro (RJ)* teve como objetivo analisar a influência da morfologia urbana no desempenho térmico tridimensional da atmosfera do CBD. Para tanto, a consideração da importância dos componentes urbanos permeou os procedimentos adotados nas etapas metodológicas, seguindo os pressupostos teórico-metodológicos de Monteiro (1976; 1990). Buscou-se também, implementar técnicas que, integradas, abrissem caminhos para alcançar o objetivo.

Sendo assim, a pesquisa contemplou três etapas: pré-campo, experimento de campo e pós-campo. Na etapa pré-campo, estimou-se a termografia média da superfície terrestre (TST) do verão (2014 a 2019) e inverno (2013 a 2019) e confeccionou-se o mapa de suscetibilidade climática (potencial de aquecimento e arrefecimento), o Mapa de Análise Climática (UC-AnMAP), partindo da consideração da morfologia urbana (altura topográfica, declividade, orientação das vertentes, efeito bioclimático, rugosidade das formas vegetais, ganhos antropogênicos, volume edificado e rugosidade). Alguns resultados foram levantados, tais como: 1) ambas as TSTs mantiveram o mesmo comportamento espacial térmico, isto é, os espaços de temperaturas elevadas estavam associados às áreas de comércio e serviços (Zona Comercial e de Serviços (ZCS) e na Zona Consolidada Central (ZCC)), Zona Residencial Multifamiliar-2 (ZMR-2) e ao Aeroporto Santos Dumont (ZOE); as áreas de menores valores de temperaturas de superfície foram o Campo do Santana, a Avenida Rio Branco e as Zonas de Uso Misto (Praça Mauá); 2) em geral, o CBD foi marcado pela elevada suscetibilidade (classes 7 e 8) a configuração da ilha de calor urbana na ZCS e ZCC, sobretudo, a Avenida Rio Branco (classes de 6 a 8); as áreas menos sensíveis (classes 2, 3, 4 e 5) ficaram concentradas no Aeroporto Santos Dumont, Zona de Uso Misto (Praça Mauá) e na Zona Residencial Multifamiliar-2 (ZMR-2).

A análise e confrontação das TSTs e do UC-AnMap foram estratégicas e essenciais para guiar o experimento de campo, pois trouxe à tona a divergência dos valores das TSTs e da suscetibilidade do UC-AnMap quanto ao espaço da Avenida Rio Branco. Decidiu-se, portanto, pela distribuição de 7 pontos amostrais na referida

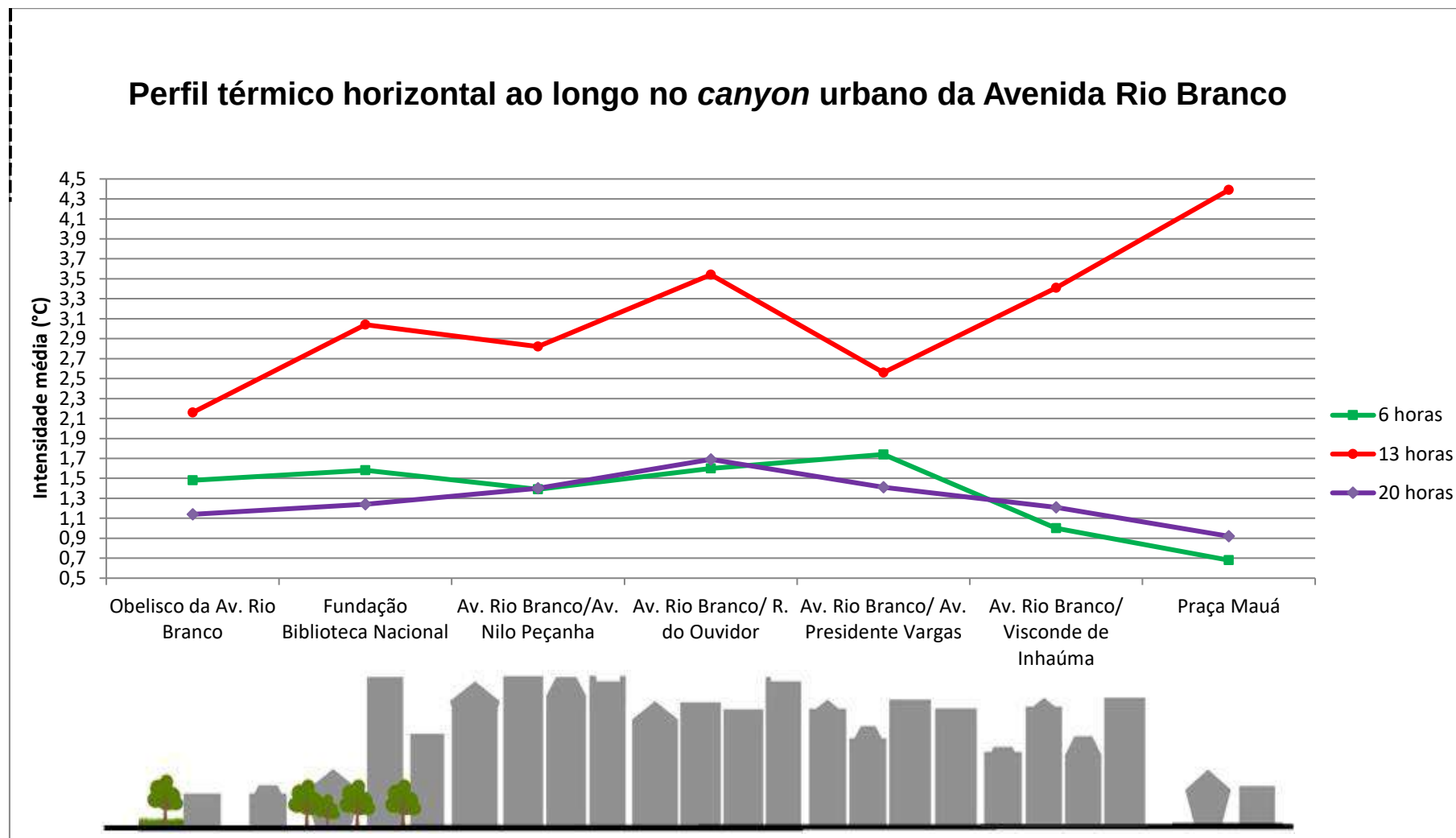
avenida, marcada pelo *canyon* urbano, para melhor compreensão do campo térmico. Desse processamento, também se decidiu pelo Aeroporto Santos Dumont para alocação da estação meteorológica de controle e pelo o Largo da Carioca para o voo da RPA.

Dessa maneira, o experimento de campo combinou coletas horizontais e verticais, às 06, 13 e 20 horas, que aconteceram durante o verão nos dias 24/01/2021, 25/02/2021, 31/01/2021, 07/02/2021, 14/02/2021, 21/02/2021, 22/02/2021, 07/03/2021, 14/03/2021 e 15/03/2021. O monitoramento horizontal foi realizado por meio de 2 transectos móveis (transecto 1: Obelisco da Avenida Rio Branco (ponto 1), Avenida Rio Branco/Fundação Biblioteca Nacional (ponto 2), Avenida Rio Branco/Avenida Nilo Peçanha (ponto 3), Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (ponto 4) e transecto 2: Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas (ponto 5), Avenida Rio Branco/Visconde de Inhaúma (ponto 6) e Praça Mauá (ponto 7). Já o monitoramento vertical foi realizado a partir do voo da RPA, que coletou dados do chão até 50 metros.

O mapeamento do campo térmico do *Central Business District* do Rio de Janeiro, especificamente ao longo da Avenida Rio Branco, reconheceu que, de fato, a morfologia urbana confere suscetibilidade à configuração de ilhas de calor, como mostra a média do perfil térmico têmporo-espacial dos pontos (Figura 46). A Figura 46 também **marca a baixa capacidade de arrefecimento da Avenida Rio Branco**, tanto é que são poucas as vezes que a ilha fria esteve presente, oscilando entre espaços distintos e em diferentes horários, de acordo com os ritmos das funções urbanas. Essa avenida, cuja produção e apropriação foram marcadas pela associação do Estado ao capital privado, tornou-se um espaço de concentração e centralização de formas verticalizadas e fluxos, potencializando os efeitos do clima urbano.

Conforme se observou, as ilhas de calor apresentaram magnitudes e intensidades que variaram segundo os distintos processos atmosféricos: ilhas de calor de até muito forte magnitude (acima de $6,1^{\circ}\text{C}$) em situação atmosférica de estabilidade; ilhas de calor de até forte magnitude ($4,1^{\circ}\text{C}$ a $6,0^{\circ}\text{C}$) em situação atmosférica de instabilidade; e ilhas de calor de até moderada magnitude ($2,1^{\circ}\text{C}$ a $4,0^{\circ}\text{C}$) em situação atmosférica pós-instabilidade.

Figura 46 – Perfil térmico horizontal ao longo do *canyon* urbano.



Fonte: A autora (2021).

Esses processos atmosféricos também contribuíram para a determinação da configuração temporo-espacial da ilha de calor dos transectos. Durante o equilíbrio estável (situação que favoreceu o condicionamento da morfologia urbana), a ilha de calor apresentou, em geral, intensidade crescente do Obelisco da Avenida Rio Branco (ponto 1) até a Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (ponto 4), no transecto 1. Isto é, quando se adentra o *canyon* urbano e se aprofunda a rugosidade e o volume edificado. Enquanto o transecto 2, apresentou intensidade crescente de ilha de calor pela manhã e pela noite, da Praça Mauá (ponto 7) até a Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas (ponto 5). Contudo, houve intensidade decrescente durante o período da tarde, do ponto 7 ao 5. Neste caso, pode ser que em alguma medida o corredor de prédio que projeta grandes sombras, formem artificialmente zonas com temperaturas mais baixas.

Já na situação de equilíbrio instável intensidades estiveram relacionadas não somente as condições microclimáticas da morfologia urbana, mas também as condições de nebulosidade. Consequentemente, observou-se no transecto 1, nos três horários de medição, uma configuração temporo-espacial do campo térmico onde os extremos, ou seja, o Obelisco da Avenida Rio Branco (ponto 1) e a Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor (ponto 4) apresentaram os núcleos mais elevados. O transecto 2 manteve o mesmo perfil da situação de estabilidade.

Diferentemente da situação de estabilidade e de instabilidade atmosférica, não foi possível observar durante a situação de pós-instabilidade um comportamento espacial-temporal marcante de mobilidade da ilha de calor. Isso pode estar relacionado à característica de transição da atmosfera, que por natureza se expressa por uma situação perturbada e mais caótica que o usual.

Independente da situação sinótica reinante nos dias de campo, em comum, percebeu-se que tanto no transecto 1 quanto no transecto 2, o horário das 13 horas foi o concentrador das cores térmicas, o que diverge da literatura nacional e internacional que aponta nos espaços marcados pela morfologia do *canyon* urbano, o horário noturno como detentor dos maiores núcleos. Embora, os dados de ventos sejam insuficientes para afirmar a hipótese, possivelmente as menores intensidades noturnas da ilha estejam relacionadas à canalização das brisas, ao longo do *canyon* da Avenida Rio Branco. **Esse resultado chama a atenção para o aprofundamento de estudos e compreensão do fenômeno das ilhas de calor em *canyons* que sejam influenciados por brisas.**

Também foi possível **identificar, com o monitoramento horizontal do campo térmico, os espaços mais críticos ao longo da Avenida Rio Branco por meio do cálculo das taxas de aquecimento diário.** Isto é, a maior ou menor eficiência que cada ponto amostral tem de conservar energia. São eles: Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor e Praça Mauá. O primeiro por se situar entre as edificações que alcançam 100 metros e cujas quadras apresentam alto potencial de cobertura do solo (50% a 100%). Também os logradouros ao redor são mais estreitos, implicando um arranjo espacial mais adensado. A Praça Mauá embora seja um espaço aberto (médio potencial de cobertura do solo), com poucas edificações ao redor (Museu do Amanhã, Odontoclínica da Marinha e o Serviço Social da Marinha), após as reformas para os Jogos Olímpicos de 2016, tornou-se árido (sem vegetação e com extensas superfícies impermeáveis). **Esse resultado traz um alerta em relação ao ponto 7, tendo em vista que o resultado da temperatura do ar diverge das menores temperaturas de superfície (TSTs) e menor suscetibilidade (UC-AnMap) registrada neste espaço.**

Outro ponto interessante é que as maiores cores registradas durante todo o experimento de campo durante o verão de 2021, não coincidem com o dia (31/01) de maior registro de temperatura do ar da estação (29,5°C), mas sim com o dia de segunda-feira. Neste dia, as ilhas de calor registraram 11,8°C, na Avenida Rio Branco/Rua do Ouvidor, e 8,3°C, na Praça Mauá. É provável que neste dia, marcado por intensa dinâmica na Avenida Rio Branca (artéria de grande importante para os fluxos do CBD), o calor antropogênico tenha contribuído (calor do metabolismo, uso de energia das construções (refrigeradores) e da circulação de veículos), revelando a importância da função urbana nas configurações térmicas do clima urbano.

Por fim, a análise vertical também convergiu em registrar o horário das 13 horas como o de maior comportamento térmico e de maior gradiente entre o chão até 50 metros. Ressalta-se que nas diferentes condições sinóticas houve indícios de inversão térmica. Contudo, foi no horário noturno, do dia de maior registro médio de temperatura do ar (29,5°C) que notamos de fato uma inversão térmica bem caracterizada ocorrendo, uma vez que a temperatura do ar, registrada na altitude máxima (28,5°C) ficou 2,3°C acima daquela obtida ao nível da rua. Neste dia de estabilidade atmosférica, cujas condições sinóticas foram favoráveis ao surgimento do fenômeno, apesar do verão, observou-se que em nível regional a radiossonda do

Galeão não detectou inversões térmicas. O que nos leva a hipótese de que, possivelmente, a rugosidade e o volume de edificações presentes no Largo da Carioca podem ter forçado a configuração do fenômeno, suscitando, um novo mecanismo de conformação do fenômeno.

Esses resultados abrem caminhos para futuras investigações sobre comportamentos atípicos da atmosfera forçados pela morfologia urbana. Bem como, a necessidade de aprofundar a análise em altitudes superiores que escapem da esfera da *urban canopy layer* (UCL) e adentrem a *urban boundary layer* (UBL). Sugere-se para a prospecção a nível vertical a utilização da aeronave remotamente pilotada (*remotely piloted aircraft* - RPA) por ter se mostrado uma ferramenta eficiente, uma vez que se manteve estável durante as coletas, sendo capaz de manter altura e posicionamento praticamente inerte. Ademais, chama-se a atenção dos pesquisadores para a importância da verificação da autonomia e qualidade de recepção e triangulação do sinal da aeronave.

Finalmente, ainda uma limitação desse trabalho, se reconhece e fica demonstrada a importância de melhor detalhamento do efeito de brisas sobre a configuração do clima urbano. A compreensão dos processos associados ao clima urbano em cidades litorâneas reveste-se de grande importância científica, demandando maior acuidade na coleta de dados devido às lacunas ainda existentes e as dificuldades inerentes a essa abordagem.

REFERÊNCIAS

- ABICHANDANI, P.; LOBO, D.; FORD, G.; BUCCI, D.; KAM, M. Wind measurement and simulation techniques in multi-rotor small unmanned aerial vehicles. **IEEE Access**, v. 8, n. 1, pp: 54910-54927, 2020.
- ACCIOLY, L. J. et al. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, pp.: 492-498, 2002.
- ACKERMAN, B. Temporal march of the Chicago heat island. **Journal climate and applied meteorology**, New York, v. 4, n. 6, pp.: 547-554, 1985.
- ACTION BIOSCIENCE. **Environment.figures** Disponível em <<http://www.actionbioscience.org/environment/figures/voogt1.jpg>>. Acesso em 26 set. 2016.
- ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de imagens: métodos e análises**. Rio de Janeiro – Brasil. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT. 2000.
- ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H. Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modeling attempts. **Theoretical and applied climatology**, Viena, v. 84, n. 1-3, pp.: 151-159, 2006.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilha de calor em Birigui - SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.1, n. 1, pp.:121-130, 2005.
- ALLEN, R. G.; et al. Surface Energy Balance Algorithms for Land. **Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation**, version 1.0, 97p., 2002.
- AMORIM, M. C. C. T. Clima urbano: concepções teóricas, metodologias, aplicações e perspectivas. Rancharia. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2015, Teresina. **Anais...** Teresina: UFPI. 2015.
- AMORIM, M. C. C. T. ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15, Ed. Especial, XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, pp.: 22-44, 2019.
- ANDRADE, H. O clima urbano – natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia**, Lisboa, v. 80, n. 40, pp.: 67-91, 2005.
- ANGELINI, L. P. **Parametrização do albedo e correção da temperatura da superfície no balanço de energia por imagens Landsat-8 na transição Cerrado-Pantanal**. 2018. 88p. Tese (Doutorado em Física Ambiental). Instituto de Física/Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2018.
- ANIELLO, C. et al. Mapping micro urban heat islands using Landsat TM and a GIS”, **Comparative Geoscience**, v. 21, pp.: 965–969, 1995.

ARNFIELD, A. J. How to do urban climatology: a personal view of legacy of professor Tim Oke. In 6th International Conference on Urban Climate. Geotborg, Sweden, 2006. Disponível em <<http://blogs.ubc.ca/toke/files/2015/12/Arnfield-2006.pdf>>. Acesso em 18 set 2019.

ASSIS, E. S. de. **A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória**. ENCAC – ELACAC, Maceió, Alagoas, Brasil. 2005.

BARBOSA, H. P. et al. Utilização de imagens do satélite Landsat-8 para a análise da emissividade e da temperatura de superfície da aglomeração urbana de Rennes (França). In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2017, Santos. **Anais...** Santos: Mendes Conventions Center. INPE. 2017.

BARROS, P. C. BRANDÃO. A. M. P. M. **Do berço histórico à zona periférica do centro: velha forma, novos Castelo** 2005. 290p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, UERJ, 2005.

BARSI, J. A. et al. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. **Proceedings, SPIE**, v. 5882. Paper 58820E. Bellingham, WA. 7p. 2005.

BARSI, J. A., BACKER, J. L.; SCHOTT, J. R. An Atmospheric correction parameter calculator for a single thermal. **Proc. IEEE IGARSS**, Toulouse, France, pp.: 3014–3016. 2003.

BELLO FUENTES, V. La isla de calor nocturna y los solos del suelo em Guadalajara. **Serie geográfica**, Alcalá/Madrid, v. 4, pp.: 83-97, 1994.

BOEGH, E. et al. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, v.79, n.1, p.329-343, 2002.

BRANDÃO. A. M. P. M. **Tendências e oscilações climáticas na área metropolitana do Rio de Janeiro**. 1987. 319p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas de Pós-Graduação em Geografia Física, USP, 1987.

BRANDÃO. A. M. P. M. As Alterações Climáticas na Área Metropolitana do Rio de Janeiro: uma provável influência do crescimento urbano. In: ABREU, M. de A. (org.). **Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, Secretaria Municipal de Cultura, Turismo e Esporte, pp.: 143-200, 1992.

BRANDÃO. A. M. P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro**. 1996. 362p. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia/FFLHC, Universidade de São Paulo, 1996.

BRANDÃO, A. M. P. M.; LUCENA. A. J. O campo térmico na área central do Rio de Janeiro em duas situações de primavera (1997 e 1998). In: IV Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ. 2000.

BRANDÃO, A. M. P. M. O clima urbano na cidade do Rio de Janeiro. In: MENDOÇA, F.; MONTEIRO, C. A. de F (orgs). **Clima urbano**. 2. Ed., São Paulo: Contexto, pp.: 121-154, 2015.

BRAZEL, A. et al. **The tale of two climates** – Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Research*, v. 15, pp.: 123-135, 2000.

BRITO, T. L. de. **Características da Ilha de Calor Urbana de Verão e Primavera na baixada de Jacarepaguá**. 2011. 52p. Monografia. Departamento de Geografia, UFRJ. 2011.

BECKRÖGE, W. Climate as a factor of a planning project – Demonstrated by the example of Dortmund Bornstrasse. **Energy and Buildings**, v. 11, pp.: 129–135, 1988.

BRÚSSOLO, R. G. **O clima e a cidade**: ilhas de calor em Assis (SP). 2015. 170p. Dissertação (Mestrado em Geografia). FCT/UNESP, Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR, 2015.

BRÚSSOLO, R. G. et al. Proposição metodológica para o estudo da camada limite urbana utilizando VANT`S. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. (Org.). **Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento**, v. 1: e-book, Campinas: Instituto de Geociências – UNICAMP, pp.: 1590-1598, 2017.

CÂMARA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. **Projeto de Lei Complementar nº 57/2018**. Disponível em: <<https://mail.camara.rj.gov.br/APL/Legislativos/scpro1720.nsf/d08c1d300048019c0325775900523a3e/3724a3c95d41b1348325822c00635c91?OpenDocument>>. Acesso em 20 set. 2020.

CANTAT, O. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. **Revue norois Viena**, n. 191, pp.: 75-102, 2004.

CHANDLER, T. J. The changing form of London's heat island. **Geography**, v. 46, part. 4, n. 213, 1961.

CHANDLER, T. J. London's urban climate. **The Geographical Journal**, v. 128, p.: 279-302, 1962.

CHANDLER, T. J. **The climate of the London**. London Hutchison. University Library Publishers. 287p. 1965.

CHARALAMPOPOULOS, ICHRONOPOLOU-SERELI, A. Mapping the urban green área influence on local climate under windless light wind conditions: The case of western part of Athens, Greece. **Acta Climatologica ET Chorologica**, v. 38–39, pp.: 25–31, 2005.

CHAVEZ, P. S. Radiometric calibration of Landsat thematic mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 55, pp.: 1285-1294, 1989.

CHEN, X., L. et al., Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes, **Remote Sensing of Environment**, v. 104 pp.: 133–146, 2006.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 7, n. 1, pp.: 31-45, 2013.

CONWAY, D.; MOULD, C.; BEWKET, W. “Over one century of rainfall and temperature observations in Addis Ababa, Ethiopia”, **International Journal Climatology**, v. 24, pp.: 77–91. 2004.

CORRÊA, R. L. O meio ambiente e a metrópole. In: ABREU, M. de A. (org). **Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, Secretaria Municipal de Cultura, Turismo e Esporte, pp.: 27-36, 1992.

DANNI, I. M. A ilha térmica de Porto Alegre: Contribuição ao estudo do clima urbano. Boletim gaúcho de geografia, Porto Alegre, v. 5, pp.: 33-48, 1980.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. Aspectos conceituais do sistema clima urbano: uma breve revisão bibliográfica sobre as ilhas de calor. **Caderno de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 15, pp.: 13-26, jul-set. 1995.

DEUS, L. A. B.; ORCAR JÚNIOR, A. C. Tendência de cobertura e uso do solo para a abscissa de sepetiba: novos elementos para o planejamento ambiental e a gestão do território. **GeoUERJ**, Rio de Janeiro, n. 37, pp.: 1-23. 2020.

DIAS, V. S. **Análise dos índices de instabilidade para previsão de formações convectivas severas para a região do aeródromo do Galeão, Aeroporto Tom Jobim**. Relatório de pesquisa. 2008. 47p. Especialização em Meteorologia Aeronáutica. Instituto de controle do espaço aéreo (ICEA). 2008.

DIMOUDI, A.; NIKOLOPOULOU, M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. **Energy and Buildings**, 35, pp.: 69-76, 2003.

DORIGON, L. P.; AMORIM, M. C. C. T. Técnicas de sensoriamento remoto (temperatura da superfície e NDVI) aplicadas aos estudos de clima urbano, o exemplo de Parnaíba/PR. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 2014, Vitória. **Anais...** Vitória: UFES. 2014.

EZBER, Y. et al. Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis, **International Journal Climatology**, vol. 27, pp.: 667–679, 2007.

FARIAS, H. S.; BRANDÃO, A. M. P. M. O campo térmico como indicador de qualidade ambiental para políticas públicas: estudo de caso no bairro Maracanã/RJ. In: III ENCONTRO DAS ANPPAS, 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: Centro de Convenções Israel Pinheiro, 2006.

FENÁNDEZ GARCÍA, F. **Manual de climatología aplicada**: clima, medio ambiente y planificación. Madrid: Editorial síntese, S.A., 285p. 1996.

FIALHO, E. S.; BRANDÃO. A. M. P. M. Particularidades do clima do Rio de Janeiro: o caso da ilha do Governador. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ. 2000a.

FIALHO, E. S.; BRANDÃO. A. M. P. M. Os contrastes térmicos na Ilha do Governador. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ. 2000b.

FIALHO, E. S. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte**: caso de Viçosa, Zona da Mata mineira. 2009. 279p. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia/FFLHC, Universidade de São Paulo, 2009.

FIALHO, E. S. O clima e sua contribuição ao planejamento da cidade por meio da elaboração de mapas climáticos. In: OSCAR JÚNIOR, A. C. O.; BERAY, N. A. (orgs). **A climatologia geográfica no Rio de Janeiro: reflexões, metodologias e técnicas para uma agenda de pesquisa**. Curitiba: Ed. Appris, pp.: 24-43, 2018.

FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. **ACT Geográfica**, Boa Vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, pp.: 61-76, 2012.

FREITAS, M. W. D. et al. Mapeamento de unidades de paisagem do município de Rio Grande – RS. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Centro de Convenções de João Pessoa. INPE. 2015.

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução: Silva Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 248p, 2010.

GEDZELMAN, S. D. et al. Mesoescala aspects of the urban heat island around New York city. **Theoretical and Applied Climatology**, Viena, v. 75, n. 1-2, pp.: 93-103. 2003.

GOLANY, G. S. Urban design morphology and thermal performance. **Atmospheric Environment**, v. 30, february 1996, pp.: 455-465, 1996.

GOMES, et al. Avaliação comparativa de correção atmosférica de imagens Landsat utilizando MODTRAN e Dark Object Subtraction. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SELPER, 2012, Caiena, 2012. **Resumos Expandidos**, Caiena, SELPER. 2012.

GOMES, W. P. **Características da Temperatura na Zona Costeira**: análise do clima urbano em Ubatuba-SP. 2017. 209p. Dissertação (Mestrado em Geografia). FCT/UNESP, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2017.

GÓMEZ, A. L. et al. **El Clima de las Ciudades Españolas**. Ediciones Cátedra, Madri. 268p. 1993a.

GÓMEZ, A. L. et al. **El Clima Urbano**. Teledetección de La Isla de Calor em Madrid. Madrid, MPOT (Ministério de Obras Públicas y Transportes), 1993b.

HESSEN, R. R. Dengue Virus Evolution and Virulence Models. **Clinical Infectious Diseases**, V. 44, Issue 11, pp.: 1462–1466. 1996.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v.4, n. 4, pp.: 367-376, 1988.

HUETE, A. R.; WARRICK, A. R. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.32, pp.: 155-167, 1990.

HUNG, H. et al. Urban thermal environment measurements and numerical simulation for na actual complex urban área covering a large distrit heating and cooling system in Summer. **Atmospheric Environment**, v. 39, pp.: 6362-6275. 2005.

HUNTINGON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream-line data with automatic removal spourius pits. **Journal of Hidrology**, n. 106, pp.: 211-232, 1989.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Banco de dados de imagens**. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>. Acesso em março de 2021.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoro do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Ed. 2, traduzida pelo Instituto nacional de Pesquisas – INPE. São Paulo, Parêntese, 672p. 2009.

JARDIM, C. H. Proposta de síntese climática a partir do comportamento térmico e higrométrico do ar em áreas urbanas. 2007. 338p. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências da UNICAMP, 2007.

JAUREGUI, E. Mexico city's urban heat island revisited. **Erdkunder**, Berlin, v. 47, pp.: 185-195. 1993.

KARL, R. R.; et al. Uebnization: Its detection and effct in the United States climate Record. **Journal of climate**, New York v. 1, n. 11, pp.: 1099-1123. 1988.

KATZSCHNER, L. The urban climate as a parameter for urban development. **Energy and Buildings**, v. 11, pp.: 137–147. 1988.

LAETA, T.; BRANDÃO. A. M. P. M. Evolução urbana e provável alterações climáticas em Jacarepaguá/RJ. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2008, Alto Caparaó. **Anais...** Alto Caparaó: UFU/ABCLima. 2008.

LAETA, T.; BRANDÃO. A. M. P. M. Ilhas de calor na baixada de Jacarepaguá/RJ. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFC/ABCLima. 2010.

LANDSBERG, H. E. **O clima da cidade**. Tradução: Prof. Dr. Tarik Rezende de Azevedo. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, v. 18, pp.: 96-111, 2006.

LANDSBERG, H. E. The urban heat island. In: **The urban climate**. Academic Press, New York, 1981.

LAZAR, R. et al. **Stadtklimaanalyse Graz. Stekgraz.** Magistrat Graz, Stadtplanungsamt: Graz; 163p. 1994.

LEE, S.H.; BAIK, J.J. Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul, **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, pp.: 227–237. 2010.

LEFEBVRE, Henri. Industrialização e urbanização. In: **Direito à cidade**. In: El derecho a la ciudad II. Barcelona: Ed. Península, 1978.

LEFEBVRE, Henri. Ciudad y urbano. In: **Espacio y Política**. El derecho a La ciudad II. Barcelona: Ed. Península, 1976.

LEFEBVRE, Henri. Da cidade à sociedade urbana. In: **Revolução Urbana**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 1999.

LEFEBVRE, Henri. **A revolução urbana**. Tradução de Sérgio Martins e Revisão Técnica de Margarida Maria de Andrade. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2008.

LEMOS, L. O et al. Urban climate maps as a public health tool for urban planning: The case of dengue fever in Rio De Janeiro/Brazil. **Urban Climate**, n. 35. 2021.

LEMOS, L. O . **Análise do subcanal termodinâmico na área central do bairro Bangu (RJ) em episódio sazonal de inverno**. 2018. 89 p. Monografia (Bacharelado em Geografia). Instituto de Geociência, Departamento de Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2018.

LEMOS, L. O et al. Urban climate map as too for urban planning and public health in Rio de Janeiro city (Brazil). In: 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment, 2018, New York. **Anais...**New York: The City College of New York. 2018.

LIMA JÚNIOR, A. F. **Análise espaço-temporal da dengue em Fortaleza e sua relação com o Clima Urbano e variáveis socioambientais**. 2018. 169p. Dissertação (mestrado em Geografia). Centro de Ciências/Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.

LIMA, N. R.; PINHEIRO, G. M.; MENDONÇA, F. O clima urbano no Brasil: análise e contribuição da metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. **Revista Geonorte**, Manaus, ed. spe, v. 2, n. 5. pp.: 626-638, 2012.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: HUCITEC, 244p., 1985.

LUCENA, A. J.; BRANDÃO, A. M. P. M. O campo térmico em Bangu em duas situações sazonais de verão e outono. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ. 2000.

LUCENA, A. J. **O clima de Bangu no contexto do Clima Urbano da cidade do Rio de Janeiro**. 2002. 91 p. Monografia (Bacharelado em Geografia). Instituto de

Geociência, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

LUCENA, A. J. O campo térmico em Bangu em episódios sazonais contrastante. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2004, Aracajú. **Anais...** Aracajú: UFS/ABClima. 2004.

LUCENA, A. J. **O campo térmico na Zona Oeste do Rio de Janeiro/RJ: uma contribuição ao estudo do clima urbano.** 2005. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociência, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LUCENA, A. J. O sistema clima urbano da zona oeste/RJ: uma contribuição ao monitoramento e análise em sistemas ambientais. **Geoambiente – Revista Eletrônica do Curso de Geografia**, Jataí, v. 15, jul-dez. 2010.

LUCENA, A. J. et al. A evolução da ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Geonorte**, ed. spe, v. 2, n. 5, pp.: 626-638, 2012.

LUCENA, A. J. Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. **Revista Continentes** (UFRRJ), ano 2, n.2, 2013.

LUZ, L. F. R. et al. Mapeamento da Temperatura da Superfície Continental do Perímetro Urbano de Palmas/TO a partir de Imagens Landsat-8. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 43, 1, pp.: 42-56, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_42_56

MALHEIROS, T. S.; BRANDÃO, A. M. P. M. O bairro de Copacabana (RJ): o campo térmico e a percepção ambiental da população em uma situação de verão e de inverno. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ. 2000.

MANGEE, N. et al. **The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska.** Theoretical and applied limatology, Viena, v. 64, n. 1-2, p. 39-47. 1999.

MANLEY, G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. **Quart.J. Roy. Meteorological Society**, vol. 84, pp.70–72. 1958.

Matzarakis, A. **Country report: Urban climate research in Germany.** IAUC Newsletter, 11, Retrieved. pp.:4–6, 2005.

MENDONÇA, F. O estudo do clima urbano no Brasil. In: MENDOÇA, F.; MONTEIRO, C. A. de F. (orgs). **Clima urbano.** 2. Ed., São Paulo: Contexto, pp.: 9-68, 2015.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MOCHIDA, A. et al. CFD analysis of mesoscale climate in the greater Tokyo area. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, V. 67/68, pp.: 459–477. 1997.

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e Clima Urbano**. 1976. São Paulo: Série Teses e Monografia. n. 25, 181 p. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geografia/FFLHC, Universidade de São Paulo, 1976.

MONTEIRO, C. A. de F. Por um suporte teórico e prático para estimular estudos geográficos de clima urbano no Brasil. **Revista Geosul**, Florianópolis, v.5, n.9, pp.: 20-60, 1990a.

MONTEIRO, C. A. de F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **Revista Geosul**, Florianópolis, v.5, n.9, pp.: 61-79, 1990b.

MONTEIRO, C. A. de F. A cidade como processo derivador ambiental e a geração de um clima urbano – estratégias na abordagem geográfica. **Revista Geosul**, Florianópolis, v.5, n.9, pp.: 80-114, 1990c.

MONTEIRO, C. A. de F. Os geossistemas como elemento de integração na síntese geográfica e fator de promoção interdisciplinar na compreensão do ambiente. **Revista de Ciências Humanas**, Florianópolis, v. 14, n. 19, pp.: 67-101, 1996.

MONTEIRO, C. A. de F. Derivações antropogenéticas dos geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas – perspectivas urbanas e agrárias ao problema da elaboração de modelos de avaliação. **Revista Raoega**, Curitiba, v. 5, pp.: 197-226, 2001.

MONTEIRO, C. A. de F. Teoria e clima urbano. In: MENDOÇA, F.; MONTEIRO, C. A. de F. (orgs). **Clima urbano**. 2. Ed., São Paulo: Contexto, pp.: 9-68, 2015.

MORRIS, C. J. G.; SIMMONDS. Associations between varyng magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia'. *International Journal of Climatology*, v. 20, pp.: 1931-1954, 2000.

NASA/GSFC - NASA's Goddard Space Flight Center - **Atmospheric Correction Parameter Calculator**. Disponível em: <<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>>.

NERY, J. et al. **Thermal Comfort Studies in Humid Tropical city**. Paper presented at the Sixth International Conference of Urban Climate. 2006.

NEVES, G. Z. F.; et al. Avaliação termo-higrométrica de sub-altitude utilizando balão cativo e quadrotor: um ensaio experimental. In: XIV Simpósio do curso de pós-graduação em ciências da engenharia ambiental. 2015. **Anais...** São Carlos. Universidade de São Paulo, pp.: 96-106, 2015.

Ng, E., Katzschner, L., Wang, Y., Ren, C., & Chen, L. **Working Paper No. 1A: Draft Urban Climatic Analysis Map** - Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment - Feasibility Study, Nov 2008. Hong Kong: From Technical Report for Planning Department HKSAR, The Chinese University of Hong Kong, Planning Department of Hong Kong Government. 2008.

NG, E. et al. Urban climatic studies for hot and humid tropical costal city of Hong Kong. In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 2009, Yokohama, Japan. **Anais...** Yokohama. 2009.

NORMAN et al. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, n. 3–4, pp.: 263–293, 1995.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. et al. Estudo da circulação dos ventos na baía de Guanabara/RJ, entre 2003 e 2013. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 13, v. 21, 2017, pp.: 59-80, 2017

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmosphere Environment**, New Yourk, v.7, pp.: 769-779, 1973.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, n.4. 1976.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**, London: Methuen, 372p, 1978.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal heat island: comparision of scale model and Field observations. **Journal of Climatology**, New York, v. 1, n. 3, pp.: 237-254. 1981.

OKE, T. R., MAXWELL, G. B. Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver, **Journal of Climatology**, v. 9. pp. 192-200, 1974.

OSCAR JÚNIOR, A. C. S.; BRANDÃO. A. M. P. M. O sistema clima urbano da ilha do fundão (RJ): subsídio para o planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, n. 1, pp.: 113-127, 2015.

PARK, H. Features of the heat island in Seoul and its surrouding cities. **Atmospheric environment**, London, v. 20, n. 10, pp.: 1859-1866, 1986.

PAVÃO, V. M. **Efeitos da correção atmosférica em imagens landsat 8 e diferentes modelo de radiação solar global na estimativa do saldo de radiação superficial**. 2016. 59p. Dissertação (mestrado em Física Ambiental). Instituto de Física/Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá. 2016.

PEREIRA, P. V. S.; BRANDÃO. A. M. P. M. Urbanização e derivações no clima local: estudo de caso no bairro Penha. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2008, Alto Caparaó. **Anais...** Alto Caparaó: UFU/ABClima. 2008.

PEZARA JÚNIOR, E. A ilha de calor da cidade: fatores e atributos. **Boletim Geográfico**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 249, pp.: 51-57, abr-jun. 1976.

PINHO, O. S.; ORGAZ. M. D. M. The urban heat island in a smal city in coastal in Portugal. **International Journal of Biometeorology**, v. 44, pp.: 198-203, 2000.

PIRES, E. G; FERREIRA JUNIOR, L. G. Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens termais dos satélites Landsat 7 e Landsat 8. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Centro de Convenções de João Pessoa. INPE. 2015.

PIRES, E. G.; FERREIRA JR, L. G. Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens termais dos satélites landsat-7 e landsat-8. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Centro de Convenções de João Pessoa. 2015.

PONGRACZ, R. et al. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. **Advances in Space Research**, v.37, pp.: 2191–2196, 2006.

RAO, P. K. Remote sensing of urban heat islands from environmental satellite. **Bulletin of the American Meteorology Society**, Boston, v. 53, n. 8, pp.: 647-648, 1972.

REN, C.; NG, E.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: A review. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, pp.: 2213–2233. 2010.

REN, C. et al. The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: the case of Kaohsiung, Taiwan. **Elsevier**, v. 31, pp.: 1-16. 2013.

RIBEIRO, C. A. M. **Atualização e aprofundamento do mapa de análises climáticas do município de João Pessoa – Paraíba**. 2013. 169p. Dissertação (mestrado em Geografia). UFBP/CT, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

RICHARDS, K. **Topoclimates and topoclimate mapping**: what do the scientific abstracts tell us about research perspectives. Paper Presented at the SIRC 2002- The 14th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre. 2002.

RIZWAN, A. M. et al. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. **Journal os Environmental Sciences**, v. 20, pp.: 129-128, 2008.

ROLINK, N. A lógica da desordem. Le monde diplomatique Brasil, ago. 2008.

ROSENFELD et al. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. **Energy and Buildings**, v. 28, pp.: 51-62, 1998.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, 1973. Proceedings. Washington, v.1, Sec. A, p. 309-317. 1973.

SANT'ANNA NETO, J. L. Desafios da climatologia geográfica no Brasil: da competência técnica ao compromisso social. In: SILVA, C. A.; FIALHO, E.S. (org.). **Concepções e Ensaio da Climatologia Geográfica**. 1ed. Dourados: Editor da UFGD, 2012, v. 1, pp.: 13-38. 2012.

SANTOS, M. **Por uma Economia Política da Cidade**. SP: Hucitec/Educ, São Paulo, 1994.

SANTOS, M. Estrutura, processo, função e forma como categorias do método geográfico. In: **Espaço e Método**. 5. Ed., 2. Reimpr. – São Paulo: Editora da Universidade São Paulo, 2014a.

SANTOS, M. Metamorfose do espaço habitado. In: **Metamorfose do Espaço Habitado**. 6. Ed., 2. Reimpr. – São Paulo: Editora da Universidade São Paulo, 2014b.

SMITH, N. **Desenvolvimento Desigual**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 242p., 2008.

SEKIGUTI, T. **Studies in Local Climatology** - temperature distribution and surface covers. In: Papers in meteorology and geophysics. Nabashi, Suginami, Tokio, Japan. Vol II, n. 9, pp.: 3-4, 1951.

SERRA, A. B.; RATISBONNA L. Clima do Rio de Janeiro. 2. ed., Transcrição de: **Boletim Geográfico**. Ministério da Agricultura. Serviço de Meteorologia, Rio de Janeiro, pp.: 527-560, 1957.

SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, 31, pp.: 221-235, 2000.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SOUZA, B. P. et al. Análise espacial de ilhas de calor da área urbana de Manaus a partir de imagens landsat 8. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2017, Santos. **Anais...** Santos: Mendes Conventions Center. INPE. 2017. STEFFES, A. C. de. La isla del calor estival em Tumuco, Chile. **Pepelez de Geografia, Muria**, n. 33, pp.: 49-60, 2001.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, pp.: 1880-1900, dec. 2012.

STEWART, I. D. Influence of meteorological conditions on the intensity and form of the urban heat island in Regina. **The Canadian Geographer**, v. 44, n. 3, pp.: 271-285, 2000.

SUNBORG, A. Climatological studies in Uppsala, with special regard to the temperature conditions in the urban area. **Geographica**, n. 22. Uppsala: Universitet Geografiska Institutionen. 111p. 1951.

SWAID, H. Intelligent Urban Forms (IUF): a new climate-concerned, urban planning strategy. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 46, pp.: 179–191, 1992.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, pp.: 99-113, 1997.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. Intensidade da ilha de calor em episódios de verão (janeiro de 2014): estudo de caso em Rancharia-SP. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2015, Teresina. **Anais...** Teresina: UFPI. 2015.

TOROK, S. J. Urban heat island features of southeast Australian towns. **Australian meteorological magazine**, Melbourne, v. 50, pp.: 1-13. 2001.

TUMANOV, S. et al. Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters. **Atmospheric Environment**, v. 33, pp.: 4173-4183, 1999.

UGEDA JÚNIOR, C. J.; AMORIM, M. C. C. T. Reflexões acerca do sistema clima urbano e sua aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. spe, pp.: 160-174, 24 out. 2016.

UNITED NATIONS. World urbanization prospectus, 2018. Department of Economic and Social Affairs United Nations. Disponível em: <https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf>. Acesso em 20 out. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat Project description**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php>. Acesso em março de 2020.

VAN DE GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, pp.: 1119–1131, 1993.

VENTURA, F. et al. Temperatura and precipitation trends in Bologna (Italy) from 1952 to 1999. **Atmospheric Research**, London, v. 61, n.1, pp.: 202-214, 2002.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Compute urban surface temperature. **Journal of applied meteorology**, New York, v. 36, n. 9, pp.: 117-1132, 1997.

VOOGT, J. A. Urban heat island, causes and consequences of global environmental change. **Encyclopedia of Global Environmental Change**, v. 3, pp.: 660-666, 2002.

VOOGT, J. A., OKE, T. R., Thermal remote sensing of urban climates, **Remote Sensing of Environment**, v. 86, pp.: 370–384, 2003.

WANG GT. **Urban Climate, Environment and Urban Planning**. Beijing Press: Beijing, China. 2004.

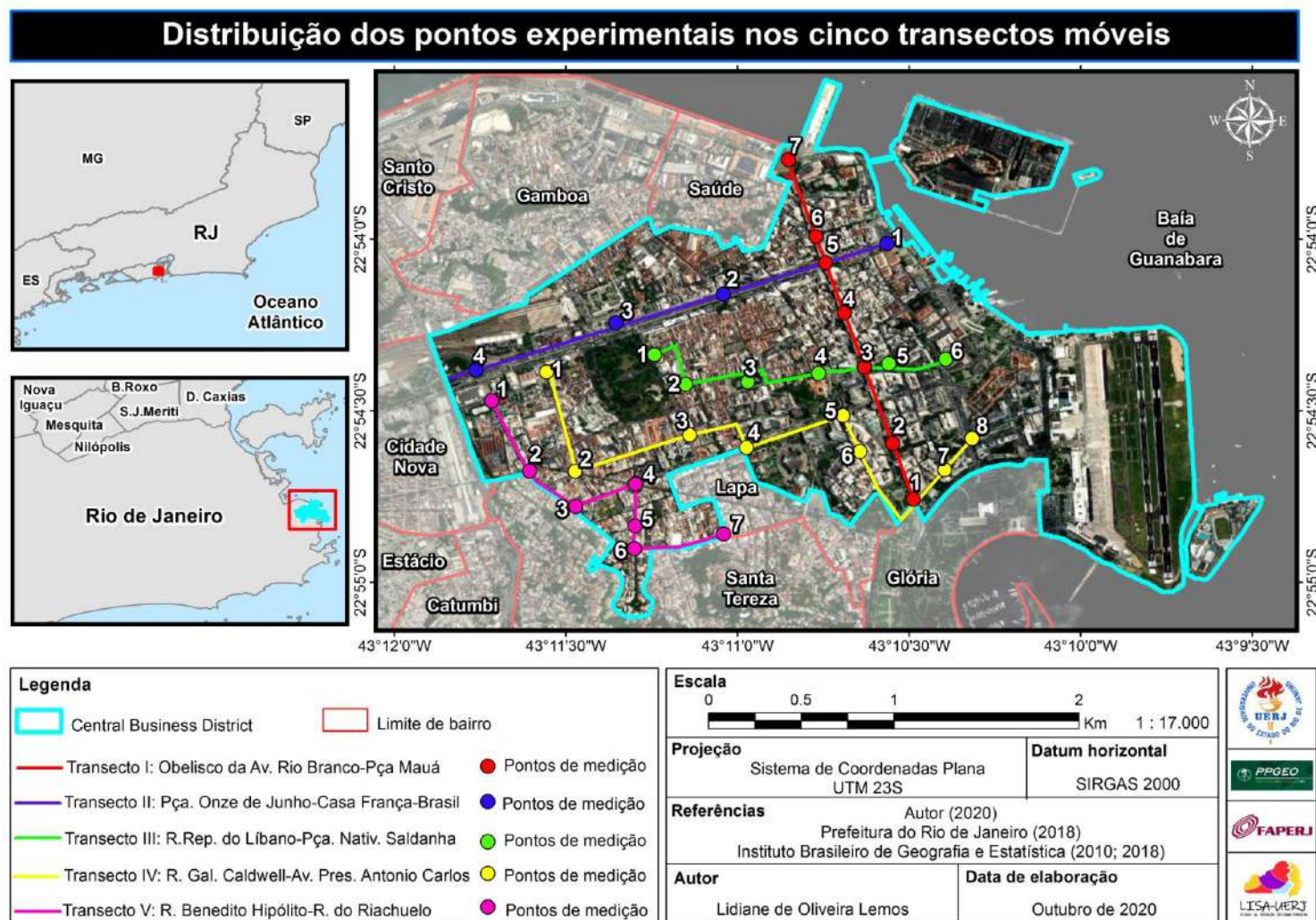
WEISS et al. Análise comparativa entre métodos de correção atmosférica em imagens do sensor Operational Land Imager (OLI), plataforma Landsat 8. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 8p. 2015.

YAMASHITA, S. detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 30 (3), pp.: 429-435, 1996.

YOSHIDA, A. **Climate Analysis for urban planning in Okayama** – Field investigation on thermal environments in Okayama. Paper Presented at the Report of Research Center for Urban Safety and Security Kobe University. 1998.

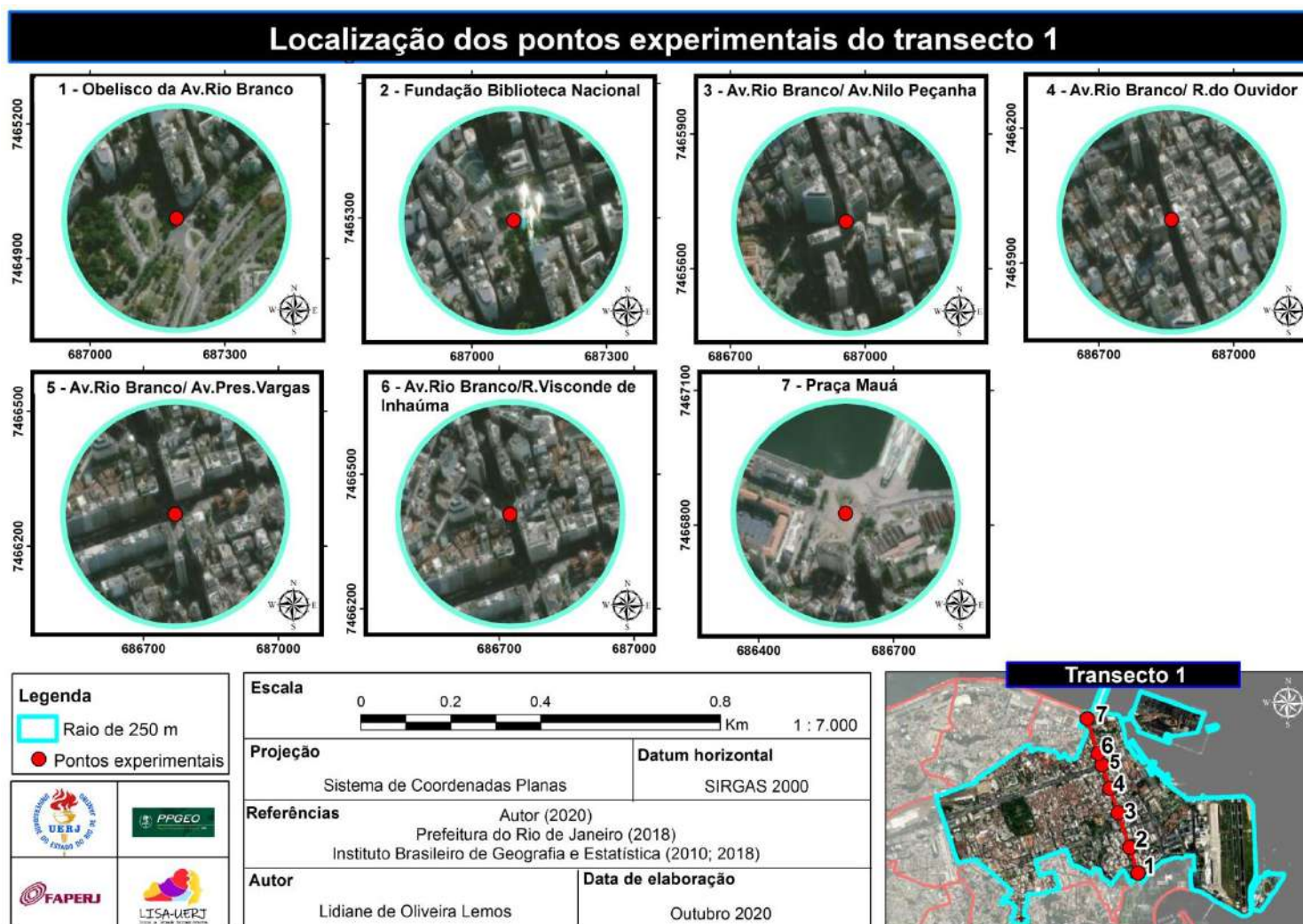
Zhang, Y. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect. *J. Remote Sens*, 10, pp.: 789–797, 2006. DOI: 10.12691/jap-4-1-3.

APÊNDICE A – Distribuição Dos Pontos Amostrais Da Proposta Inicial Do Experimento De Campo, Ao Longo Dos Transectos.



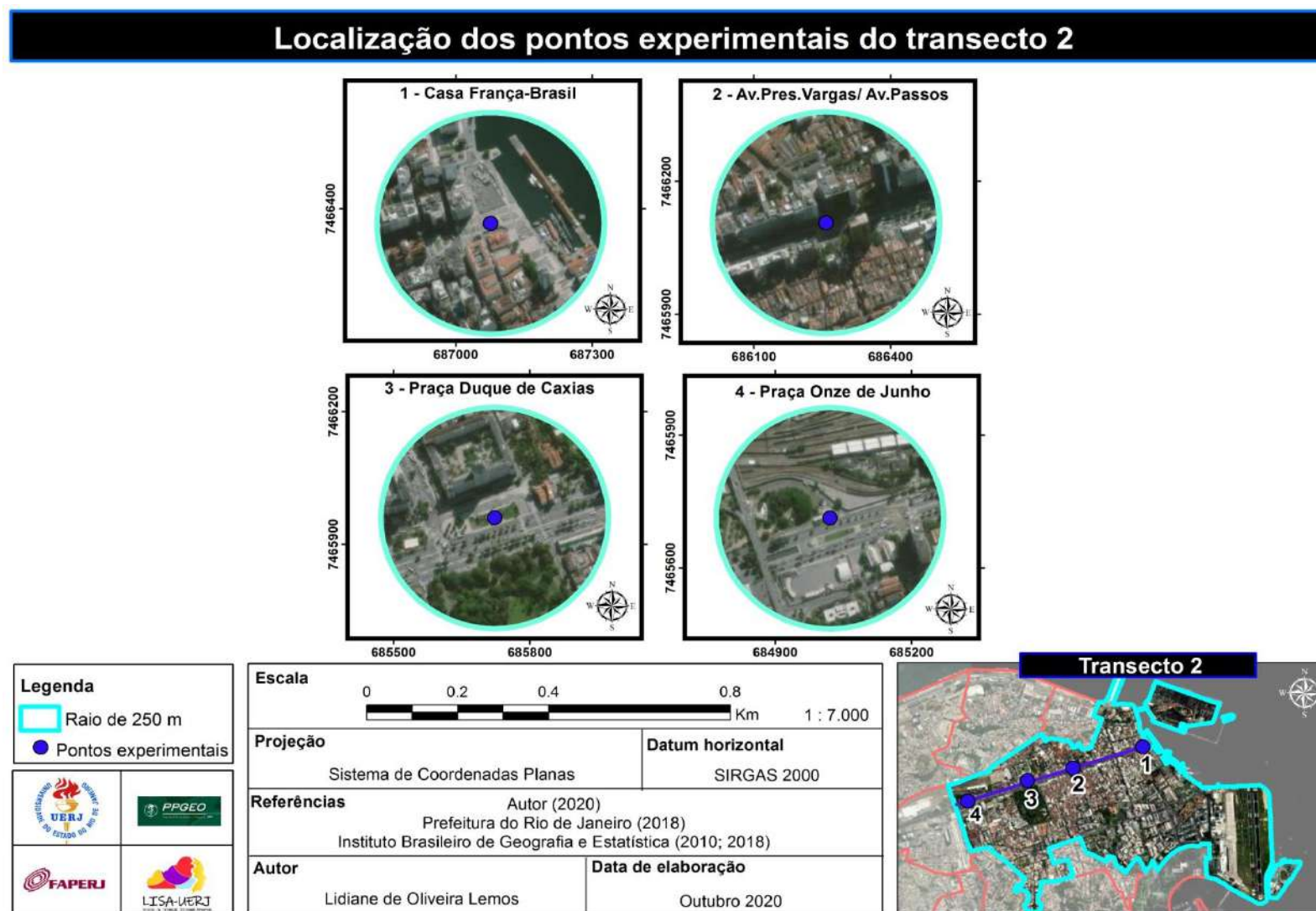
Elaboração; A autora (2020).

APÊNDICE B – Localização Dos Pontos Experimentais Do Transecto 1.



Elaboração; A autora (2020).

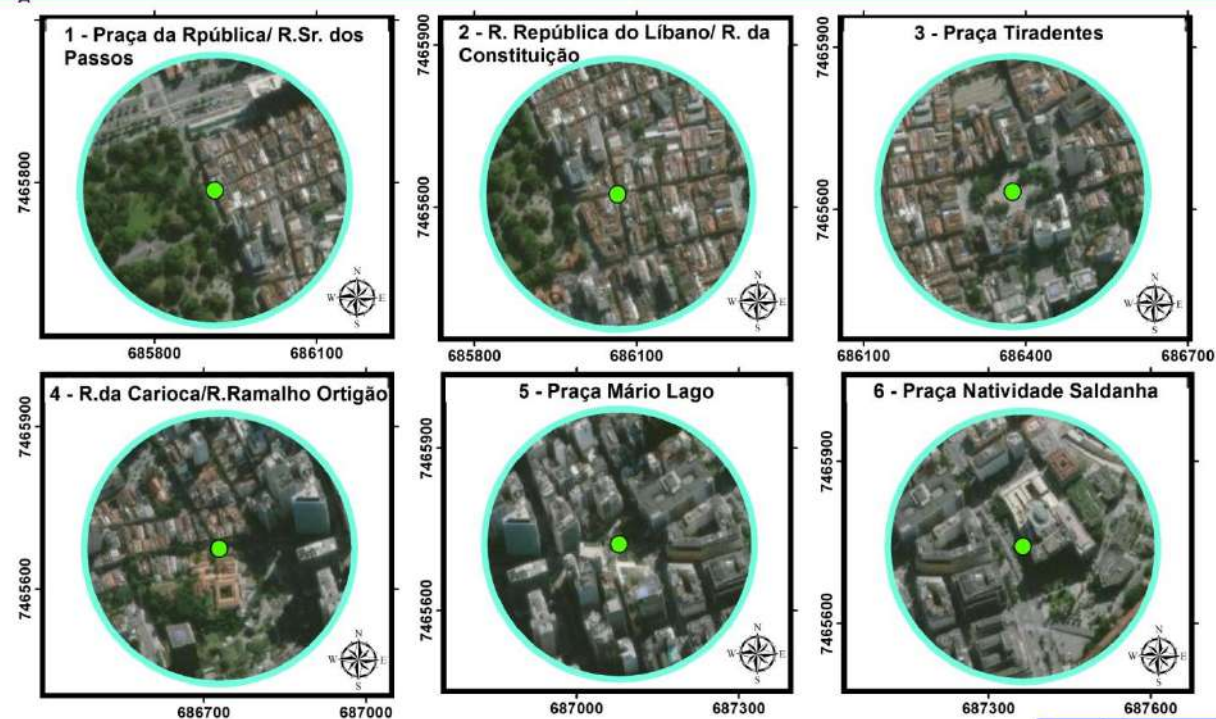
APÊNDICE C – Localização Dos Pontos Experimentais Do Transecto 2.



Elaboração; A autora (2020).

APÊNDICE D – Localização Dos Pontos Experimentais Do Transecto 3.

Localização dos pontos experimentais do transecto 3



Legenda

Raio de 250 m

● Pontos experimentais



Escala

0 0.2 0.4 0.8 Km 1 : 7.000

Projeção	Datum horizontal
Sistema de Coordenadas Planas	SIRGAS 2000

Referências

Autor (2020)
 Prefeitura do Rio de Janeiro (2018)
 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010; 2018)

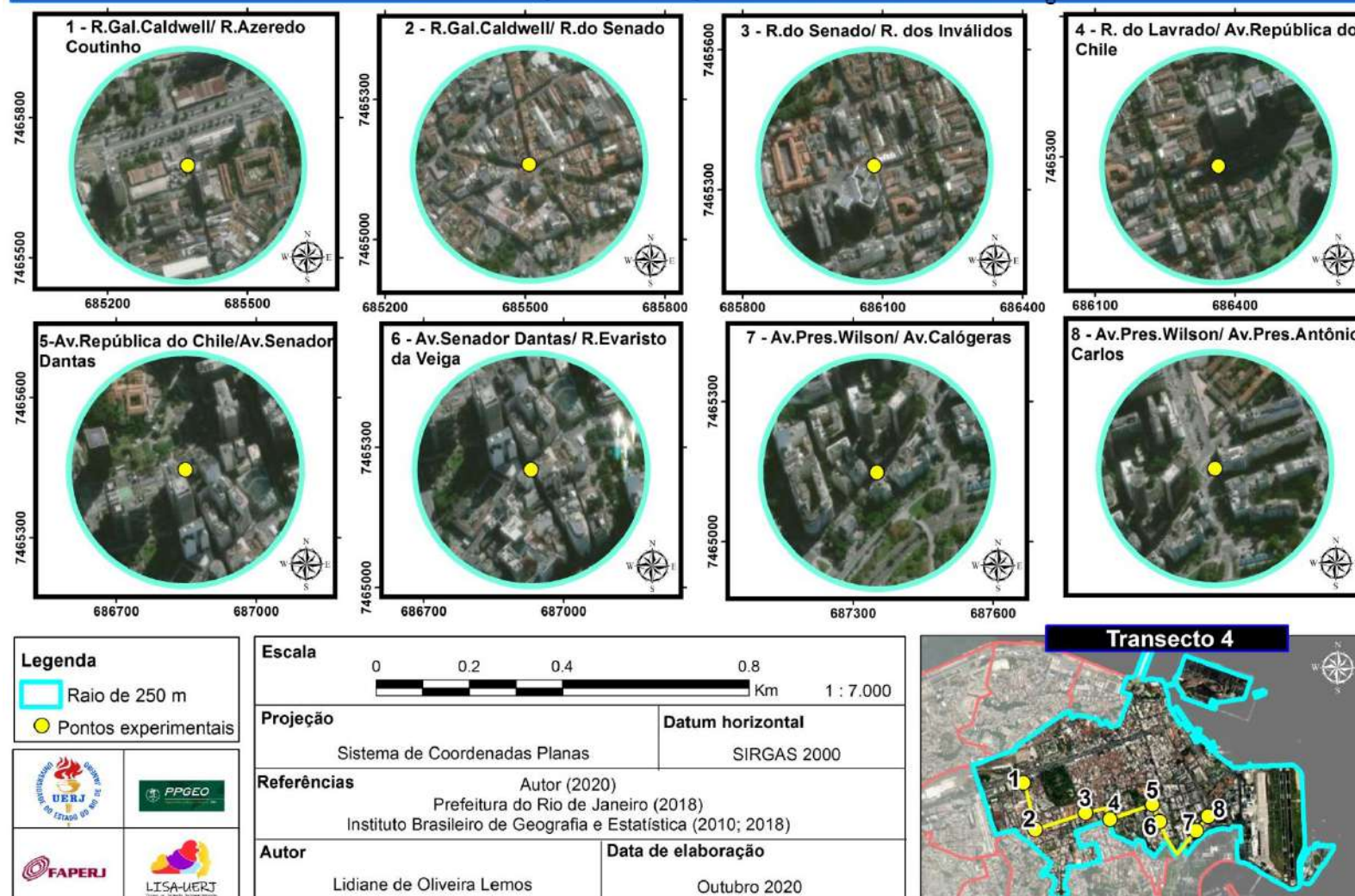
Autor	Data de elaboração
Lidiane de Oliveira Lemos	Outubro 2020



Elaboração; A autora (2020).

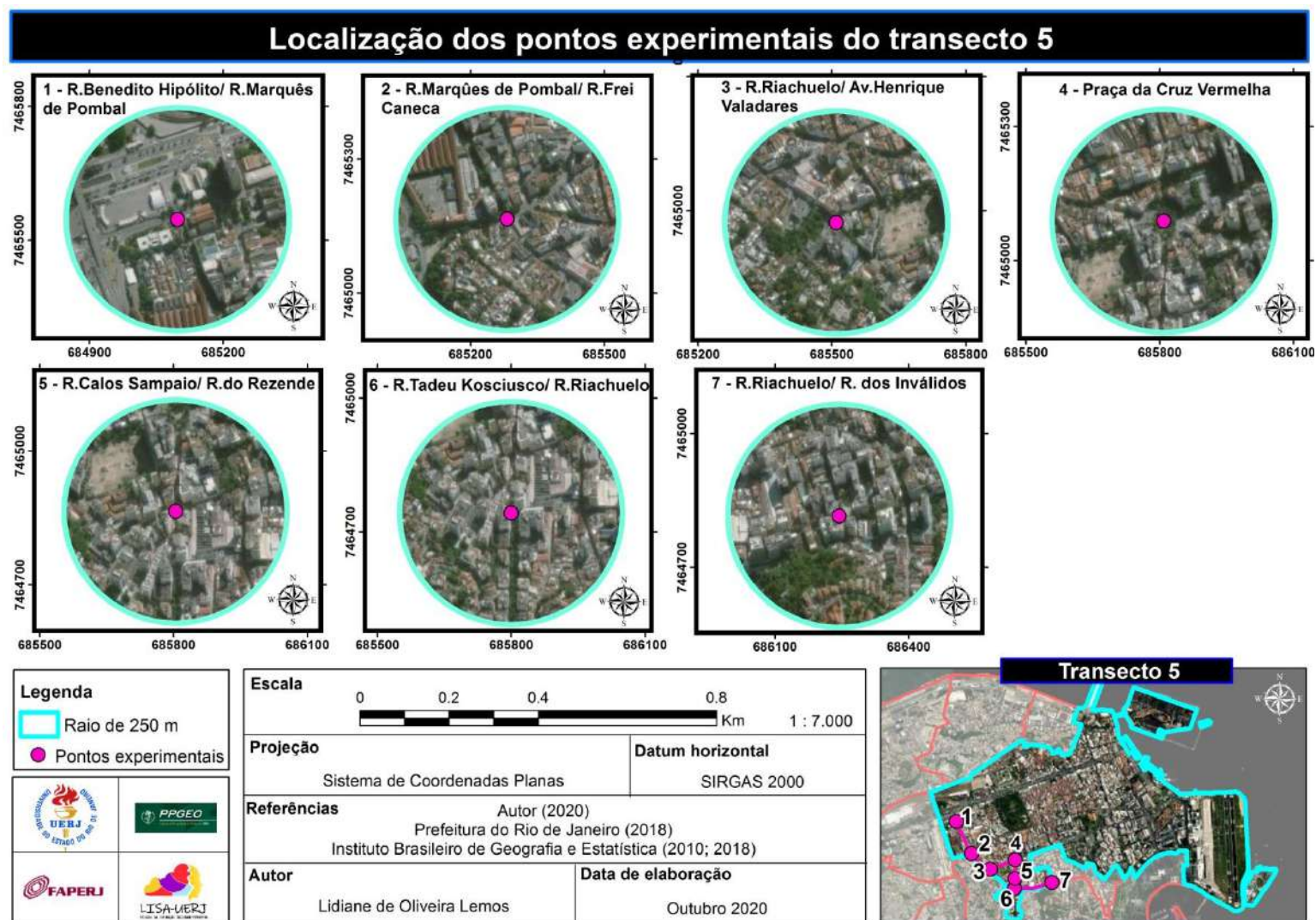
APÊNDICE E – Localização Dos Pontos Experimentais Do Transecto 4.

Localização dos pontos experimentais do transecto 4



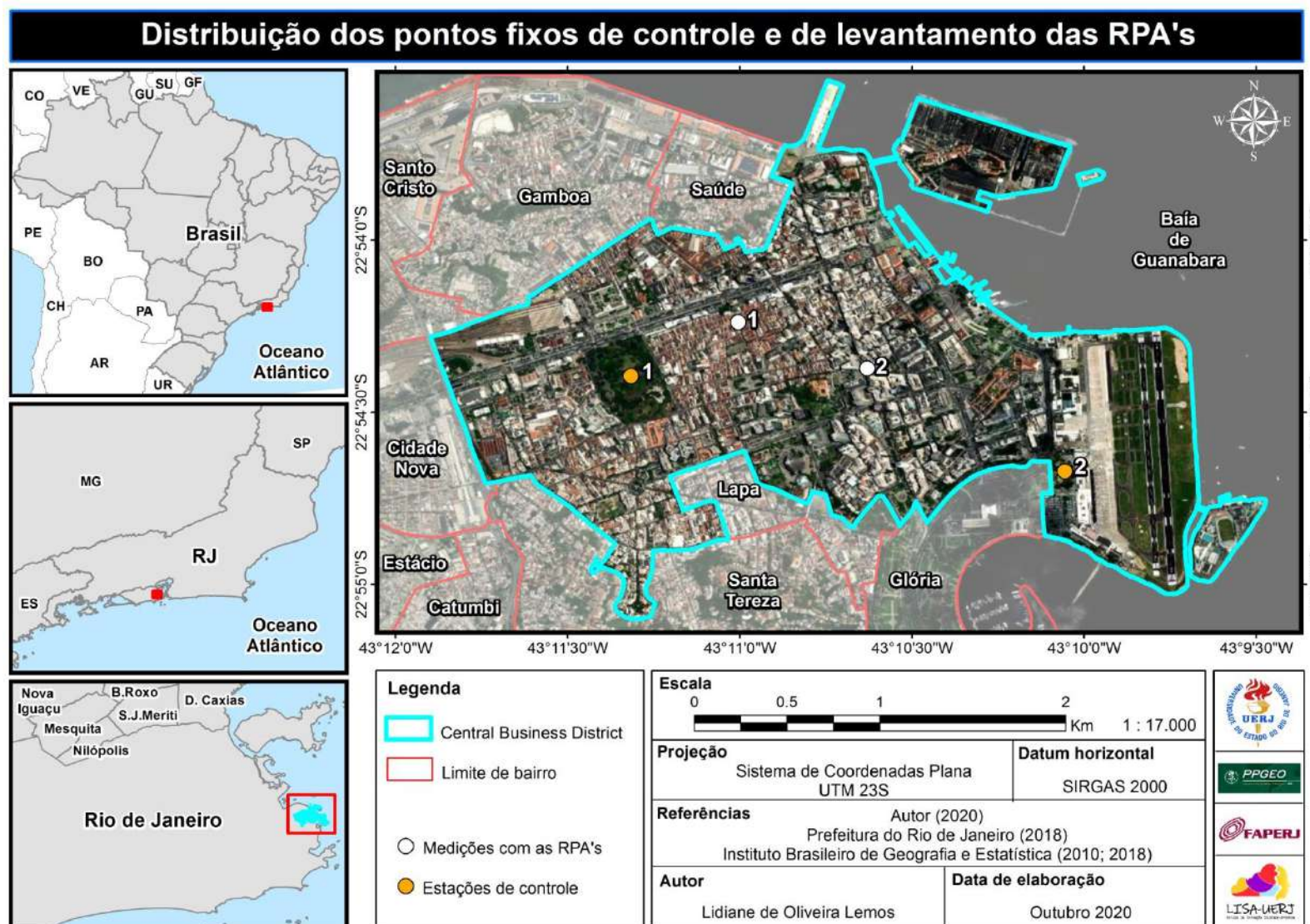
Elaboração; A autora (2020).

APÊNDICE F – Localização Dos Pontos Experimentais Do Transecto 5.



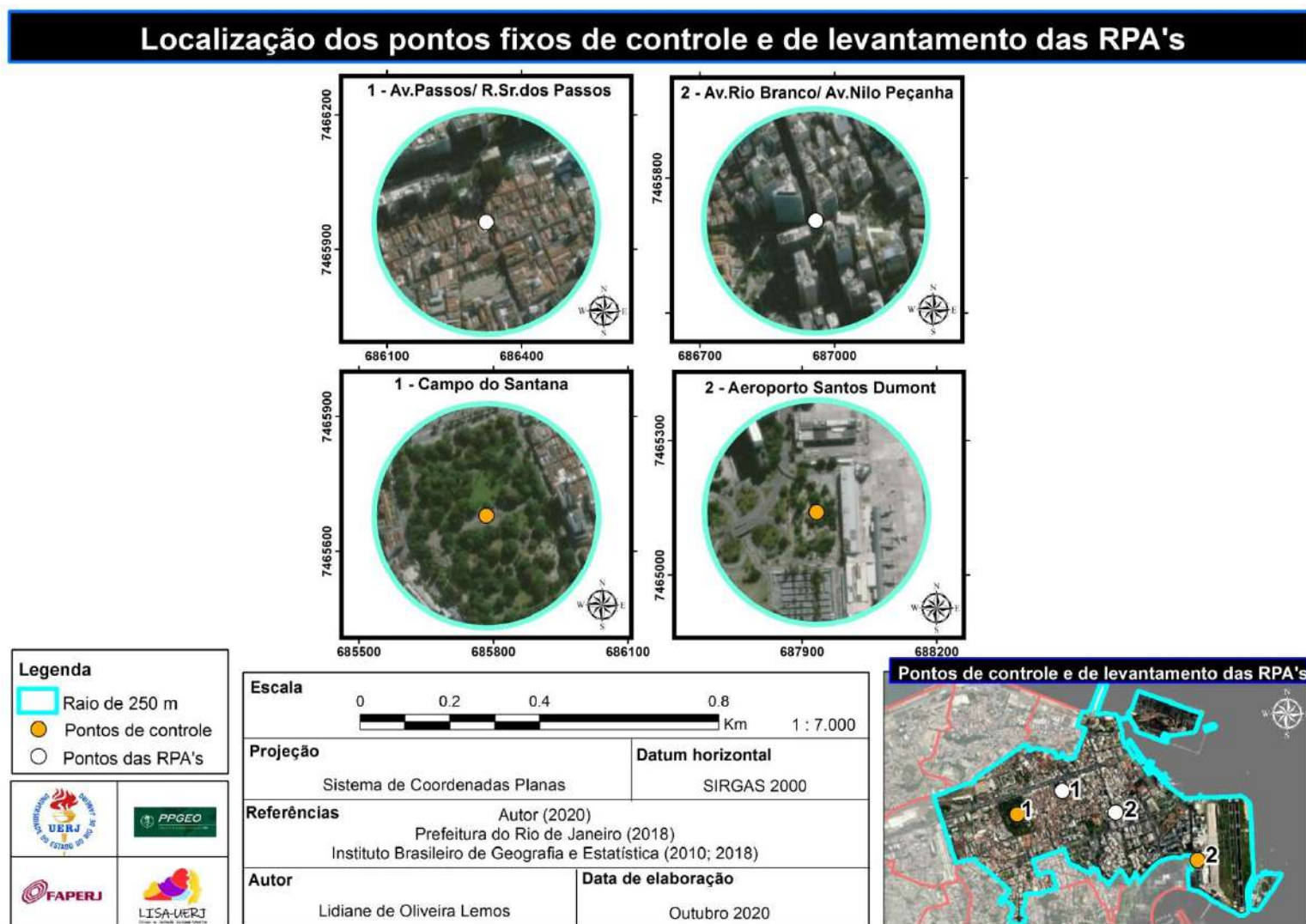
Elaboração; A autora (2020).

APÊNDICE G – Distribuição dos pontos de controle e levantamento Das RPA'S.



Elaboração; A autora (2020).

APÊNDICE H – Localização Dos Pontos De Controle e Levantamento Das RPA'S.



Elaboração; A autora (2020).

APÊNDICE I – Galeria De Foto Dos Pontos Do Transecto 1

Ponto 1 – Obelisco Da Avenida Rio Branco (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

Ponto 2 – Avenida Rio Branco/Fundação Biblioteca Nacional (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

Ponto 3 – Avenida Rio Branco /Avenida Nilo Peçanha (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

Ponto 4 – Avenida Rio Branco /Rua do Ovidor (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE J – Galeria De Foto Dos Pontos Do Transecto 2

Ponto 7 – Praça Mauá (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

Ponto 6 – Avenida Rio Branco/Avenida Visconde De Inhaúma (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

PONTO 5 – Avenida Rio Branco/Avenida Presidente Vargas (360°) + Visão Do Céu



Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE K – Estação Meteorológica



Fonte; A autora (2021).

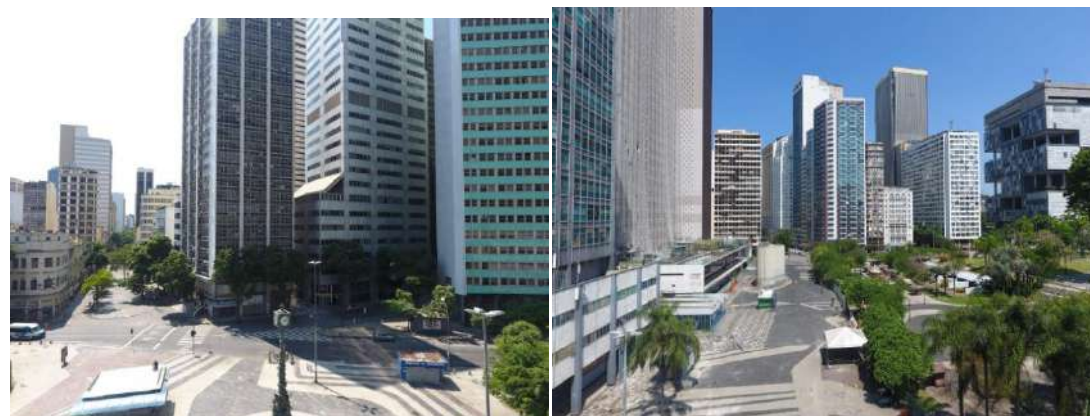
APÊNDICE L – Galeria De Foto Do Largo Da Carioca

10 metros (Canyon Urbano)



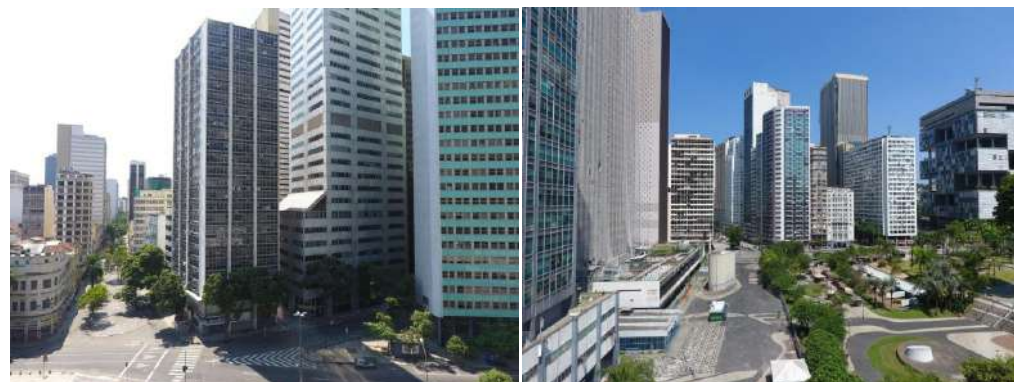
Fonte: A autora (2021).

20 metros (Canyon Urbano)



Fonte: A autora (2021).

30 metros (Canyon Urbano)



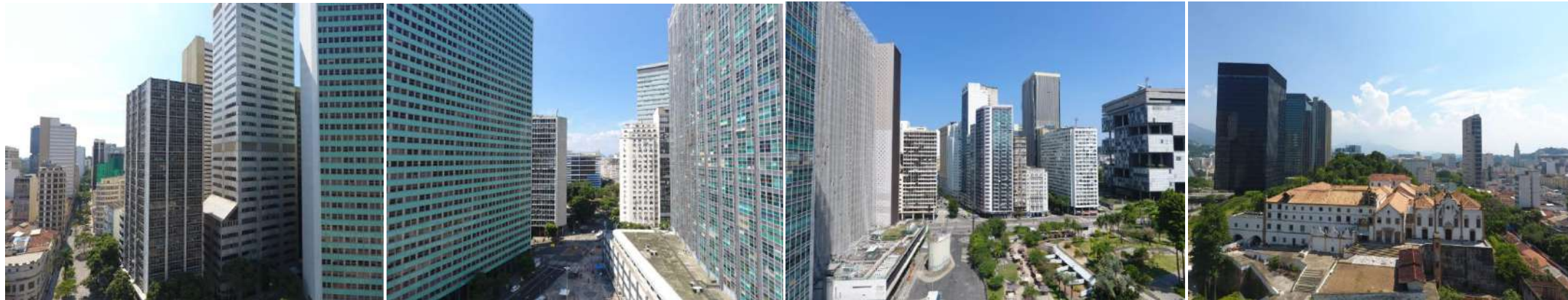
Fonte: A autora (2021).

40 metros (Canyon Urbano)



Fonte: A autora (2021).

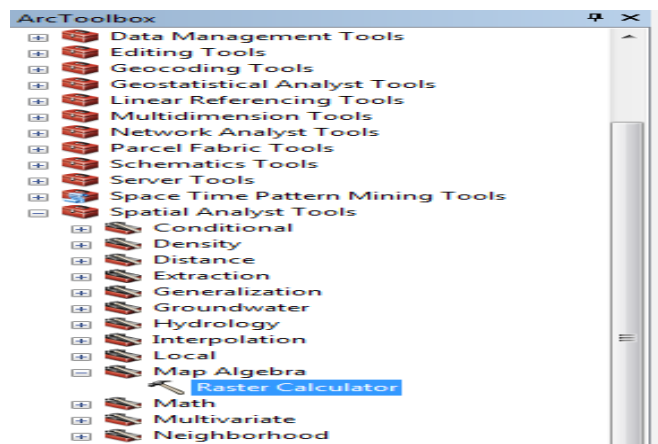
50 metros (Canyon Urbano) (360°)



Fonte: A autora (2021).

APÊNDICE M – Tutorial: Correção Atmosférica No Software Arcgis 10.5 Com Imagem Orbital Landsat-8 – Temperatura Da Superfície

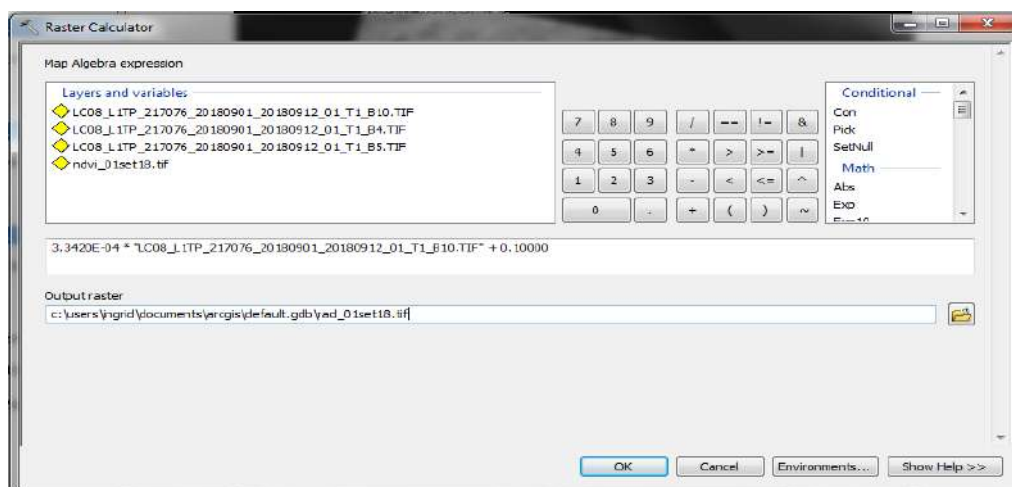
1º Etapa: Pelo **ArcToolbox**, acionar o **Raster Calculation**. Uma janela abrirá.



2º Etapa: Correção radiométrica – conversão de DN's para radiância espectral TOA, segundo a equação da USGS. Insira a fórmula abaixo na calculadora raster. O processo deve ser restrito a banda 10 (banda termal) da imagem LANDSAT-8.

$$L\lambda (L_{TOA}) = ML * Q_{cal} + AL$$

Os valores ML (RADIANCE_MULT_BAND_x, onde x é a banda 10) e AL (RADIANCE_ADD_BAND_x, onde x é a banda 10) são encontrados nos metadados (arquivo MTL) da banda 10, imagem LANDSAT-8. Qcal é a própria imagem banda 10.

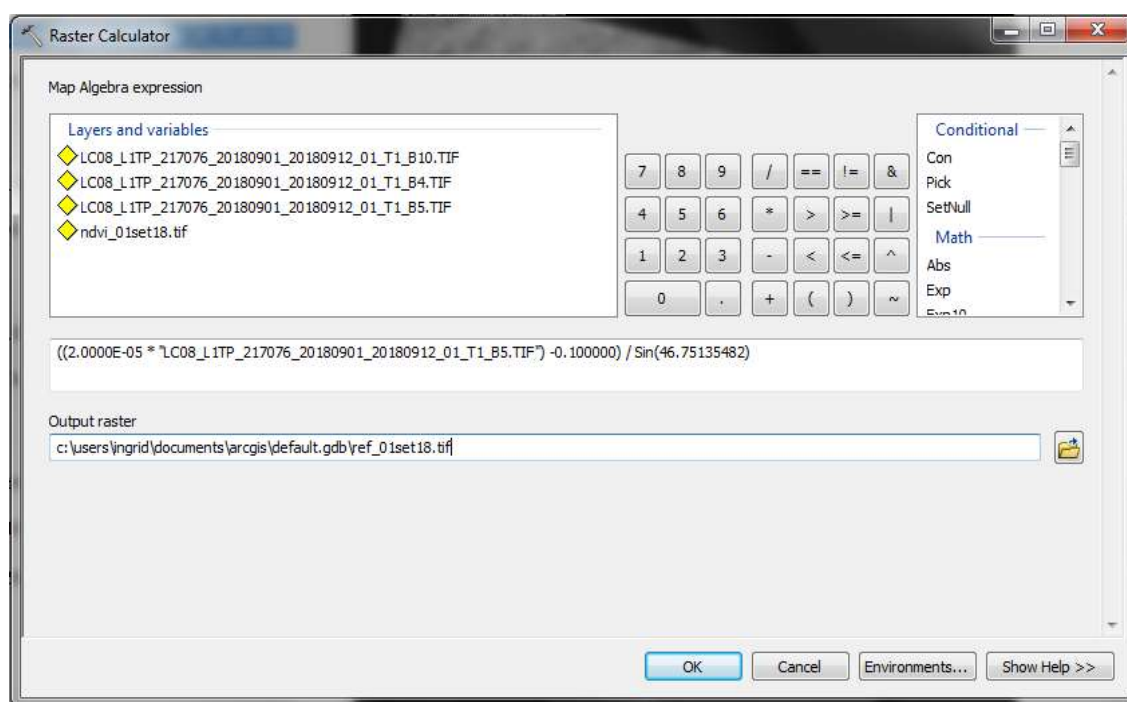


- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.

3º Etapa: Correção radiométrica – conversão de DN's para reflectância e correção da reflectância. O processo deve ser restrito às bandas 4 e 5 da imagem LANDSAT-8. Insira a fórmula abaixo, na calculadora raster, que corresponde a uma adaptação das equações indicadas pela USGS para o processo.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{SE})} = \frac{((M\rho * Q_{cal}) - A\rho)}{\sin(\theta_{SE})}$$

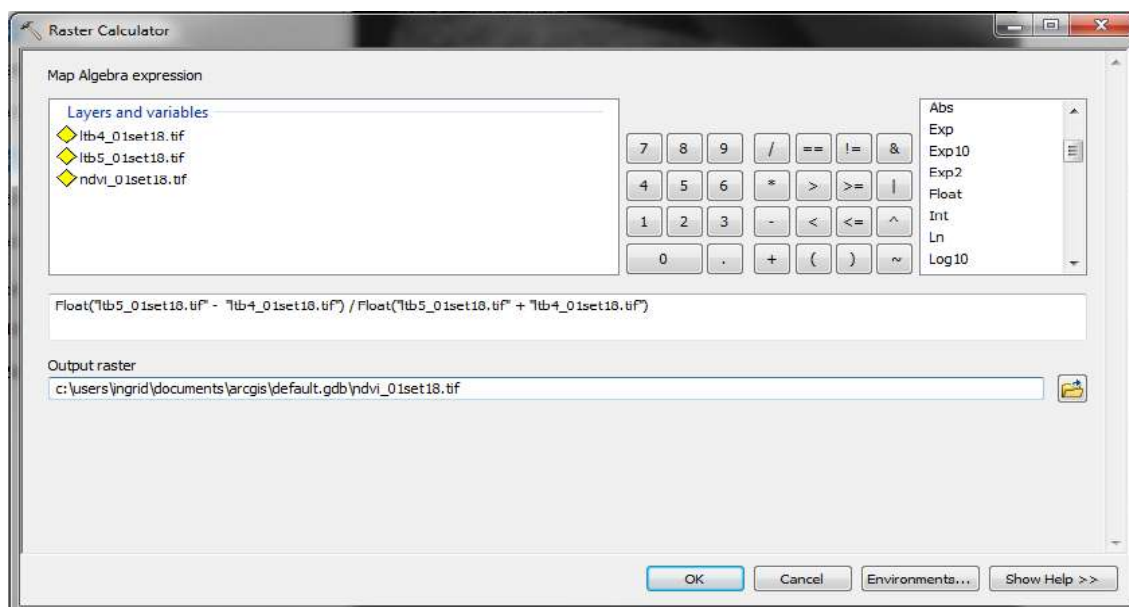
Os valores de $M\rho$ (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, onde x são as bandas 4 e 5), $A\rho$ (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x são as bandas 4 e 5) e $\sin(\theta_{SE})$ são encontrados nos metadados (arquivo MTL) das bandas 4 e 5, imagem LANDSAT-8. Q_{cal} são as imagens das bandas 4 e 5.



- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.

4º Etapa: Calcule o NDVI com as reflectâncias das bandas 4 e 5, devidamente corrigidas.

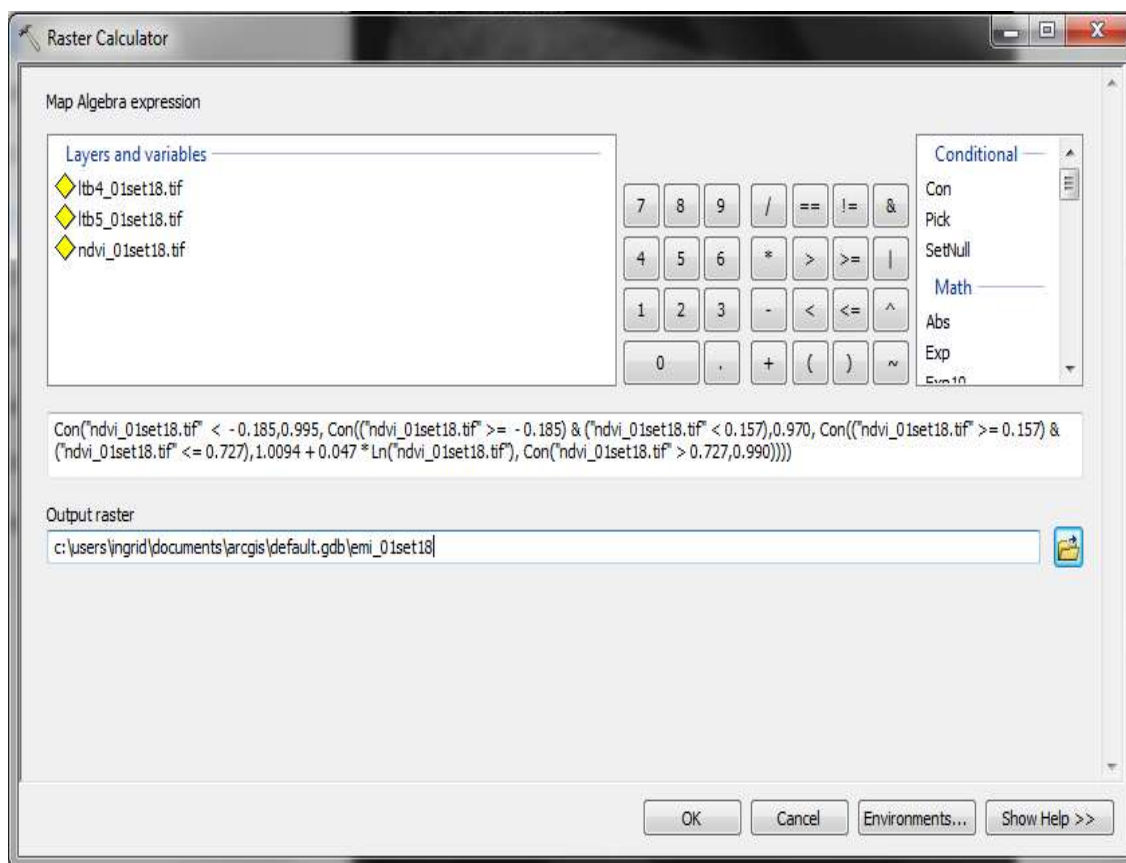
$$\text{NDVI} = \text{float}(\text{NIR} - \text{RED}) / \text{float}(\text{NIR} + \text{RED}) \rightarrow \text{NDVI} = \text{float}(\text{B5} - \text{B4}) / \text{float}(\text{B5} + \text{B4})$$



- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.

5º Etapa: Calcule a emissividade da banda 10, a partir do NDVI, segundo Van de Griend; Owe (1993) e Zhang et al. (2006). Insira, na calculadora raster, as condições que abarque as referências da tabela abaixo.

NDVI	Emissividade de superfície (E _i)
NDVI < -0.185	0.995
-0.185 ≤ NDVI < 0.157	0.970
0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727	1.0094 + 0.047ln(NDVI)
NDVI > 0.727	0.990



6° Etapa: Entre no site da NASA, através do endereço <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>, para acessar a **Calculadora de Parâmetros de Correção Atmosférica** e obtenha a transmitância (τ), radiância emitida (L_u) e radiância recebida (L_d). Preencha as seguintes informações com base nos metadados (arquivo MTL) da banda 10, imagem LANDSAT-8:

- Informações de ano, mês, dia horas e minutos da imagem LANDSAT-8;
- Latitude e Longitude da imagem LANDSAT-8 ;
- User interpolated atmospheric profile for given lat/long;
- Use mid-latitude summer ou winter (...): Esta informação alternará, segundo a imagem de verão ou inverno;
- Use LANDSAT-8 TIRS band 10 spectral response curve;
- Informações de altitude, temperatura, pressão e umidade relativa da estação climatológica de referência;
- Um e-mail deve ser obrigatoriamente informado. Os resultados desejados também serão encaminhadas para ele.

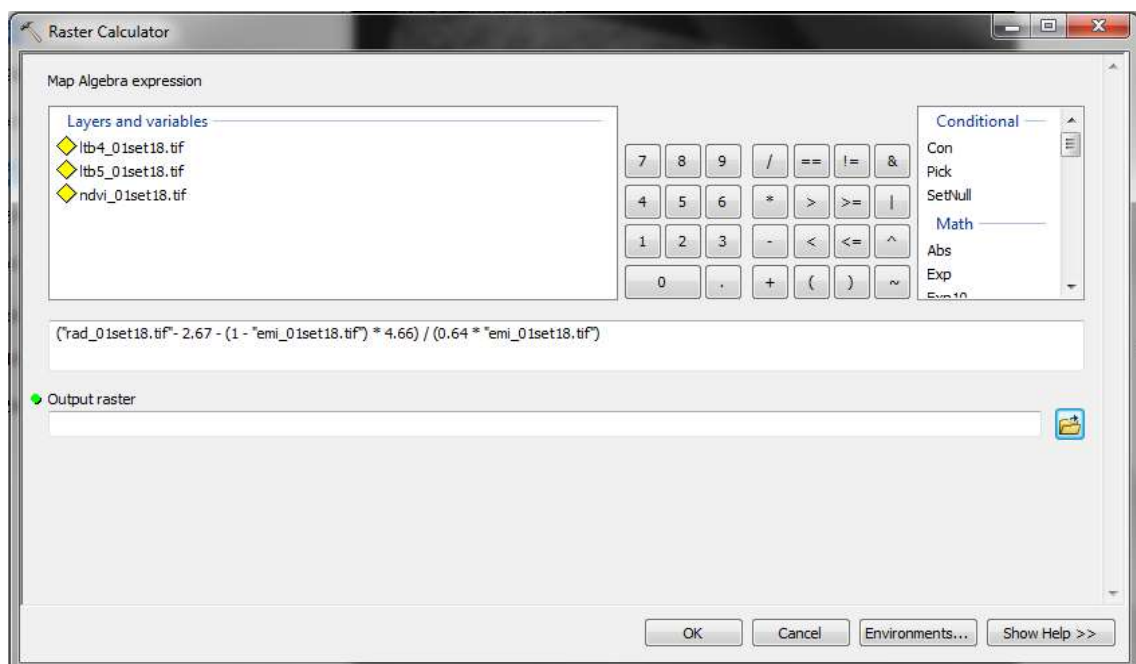
Atmospheric Correction Parameter Calculator

Enter the parameters for which you wish calculate atmospheric transmission and upwelling radiance:

Year:	Month:	Day:
GMT Hour:	Minute:	
Latitude: + is North, - is South		
Longitude: + is East, - is West		
☐ Use atmospheric profile for closest integer lat/long help ☒ Use interpolated atmospheric profile for given lat/long help		
☐ Use mid-latitude summer standard atmosphere for upper atmospheric profile help ☒ Use mid-latitude winter standard atmosphere for upper atmospheric profile help		
☐ Use Landsat-8 TIRS Band 10 spectral response curve ☒ Use Landsat-7 Band 6 spectral response curve ☐ Use Landsat-5 Band 6 spectral response curve ☐ Output only atmospheric profile, do not calculate effective radiances		
Optional: Surface Conditions <i>(If you do not enter surface conditions, model predicted surface conditions will be used. If you do enter surface conditions, all four conditions must be entered.)</i>		
Altitude (km):	Pressure (mb):	
Temperature (C):	Relative Humidity (%):	
Results will be sent to the following address:		
Email:		
Calculate		

7º Etapa: Corrija os efeitos atmosféricos sobre a radância. Insira a equação na calculadora raster, utilizando os dados anteriores necessários.

$$L_T = \frac{L_{TOA} - L_u - (1 - \varepsilon) * L_d}{\tau * \varepsilon}$$



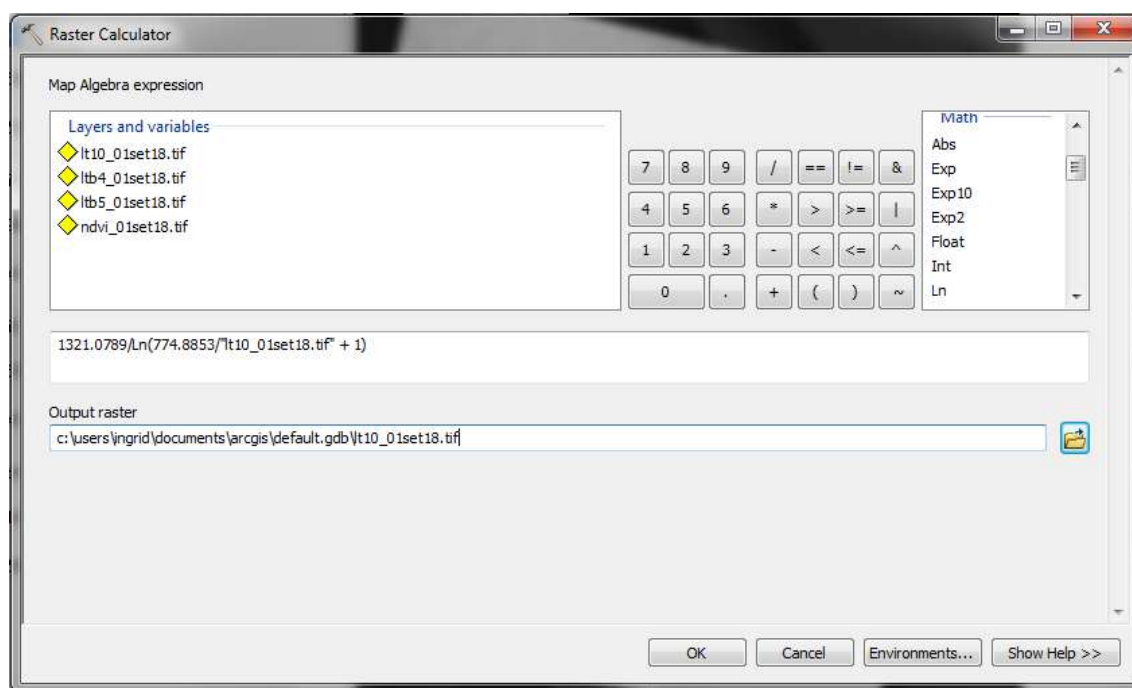
- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.

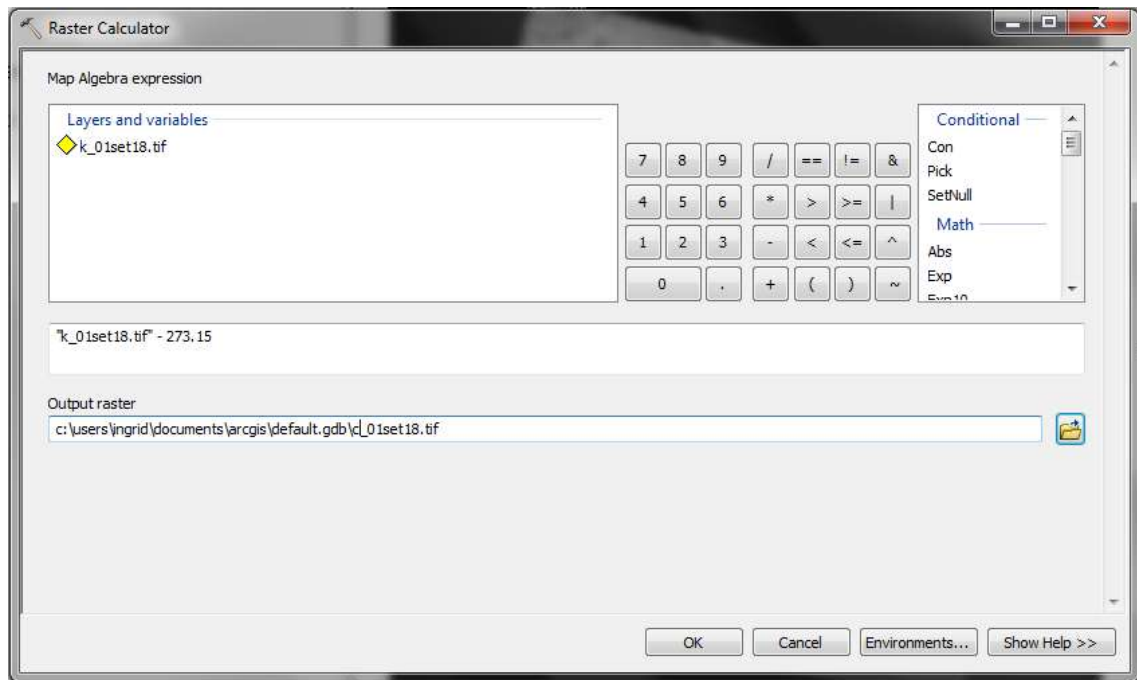
7º Etapa: Calcule a TST. A equação de Plank, para o cálculo da TST, gera os resultados em Kelvin (K), sendo necessário converter para Celcius (°C).

$$K = K2 / \ln(K1 / Lt + 1)$$

$$C = K - 273.15$$

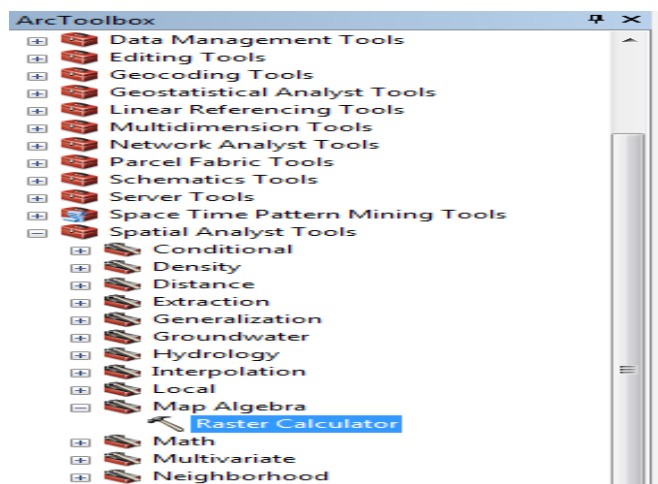
- Os valores de K2 (K2_CONSTANT_BAND_x, onde X é a banda termal) e K1 (K1_CONSTANT_BAND_x, onde X é a banda termal) são encontrados nos metadados (arquivo MTL) da banda 10, imagem LANDSAT-8.





APÊNDICE N – Tutorial: Índice De Área Foliar No Software Arqgis 10.5 Com Imagem Orbital Landsat-8

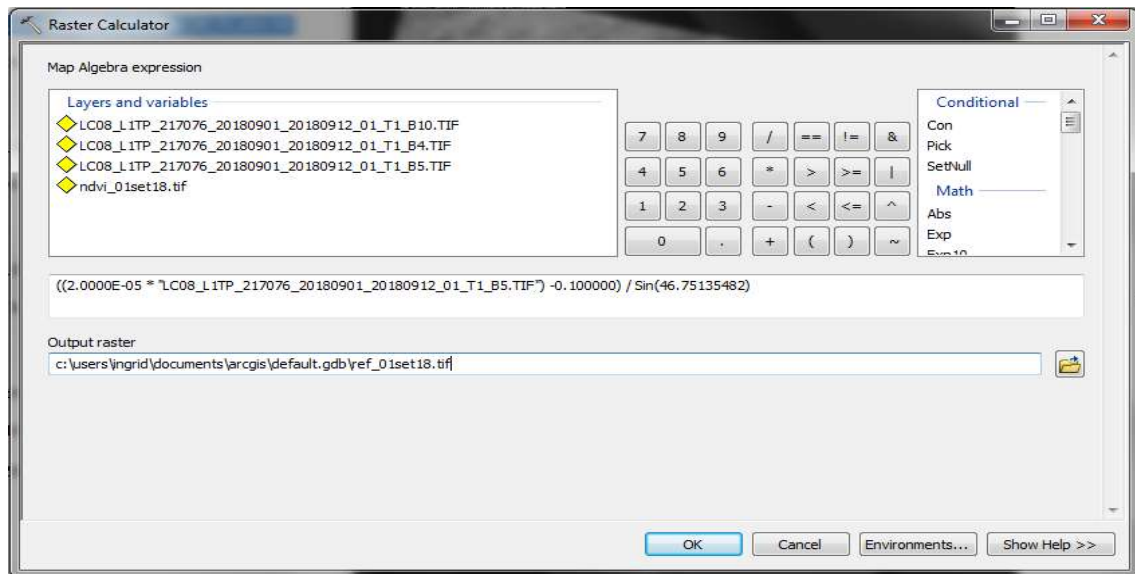
1º Etapa: Pelo **ArcToolbox**, acione o **Raster Calculation**. Uma janela abrirá.



2º Etapa: Correção radiométrica (conversão de DN's para reflectância) e correção da refletância. O processo deve ser restrito as bandas 4 e 5 da imagem LANDSAT-8. Insira a fórmula abaixo na calculadora raster, que corresponde a uma adaptação das equações indicadas pela USGS, para o processo.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{SE})} = \frac{((M_p * Q_{cal}) - A_p)}{\sin(\theta_{SE})}$$

Os valores de M_p (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, onde x são as bandas 4 e 5), A_p (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x são as bandas 4 e 5) e $\sin(\theta_{SE})$ são encontrados nos metadados (arquivo MTL) das bandas 4 e 5, imagem LANDSAT-8. Q_{cal} são as imagens das bandas 4 e 5.



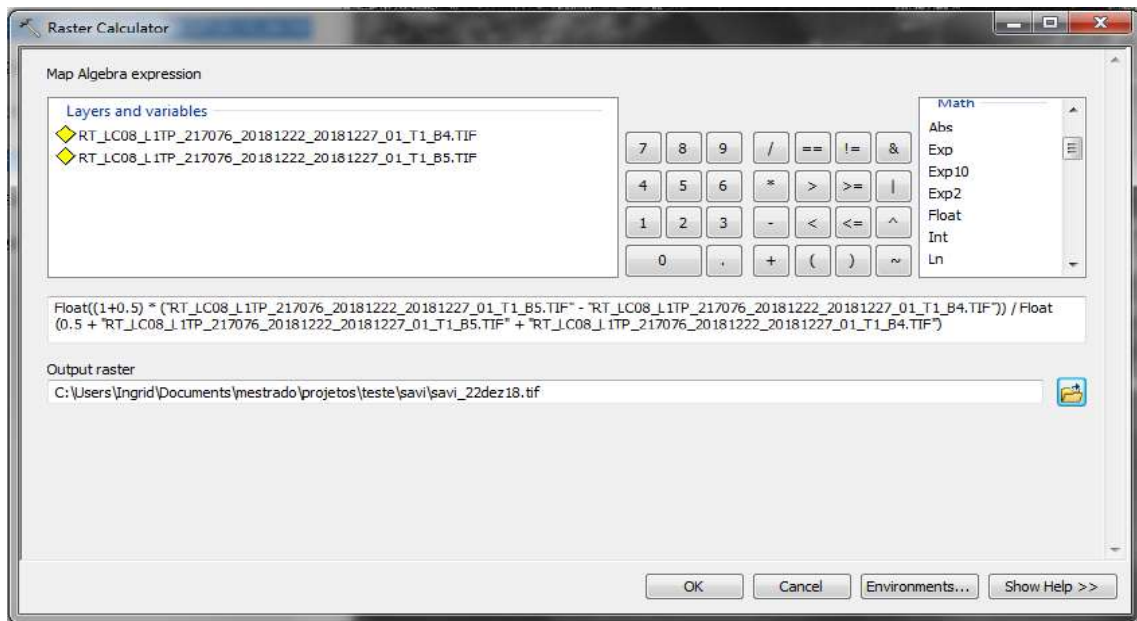
- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.

3º Etapa: Calcule o SAVI, a partir das reflectâncias corrigidas.

$$\text{SAVI} = \text{Float} ((1+L) * (\text{NIR} - \text{RED})) / \text{Float} (0.5 + \text{NIR} + \text{RED})$$

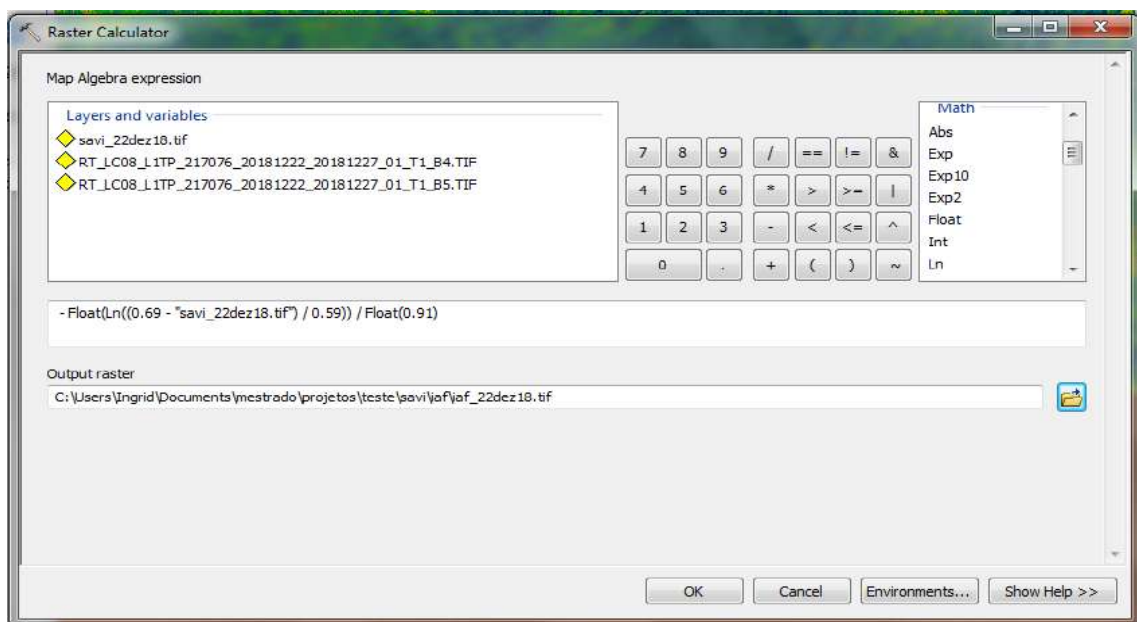
L é o fator de ajuste do solo, cujo valor mais frequentemente usado é 0,5 (Accioly *et al.*, 2002; Boegh *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2005).

- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.



5º Etapa: Calcule o IAF, a partir do SAVI.

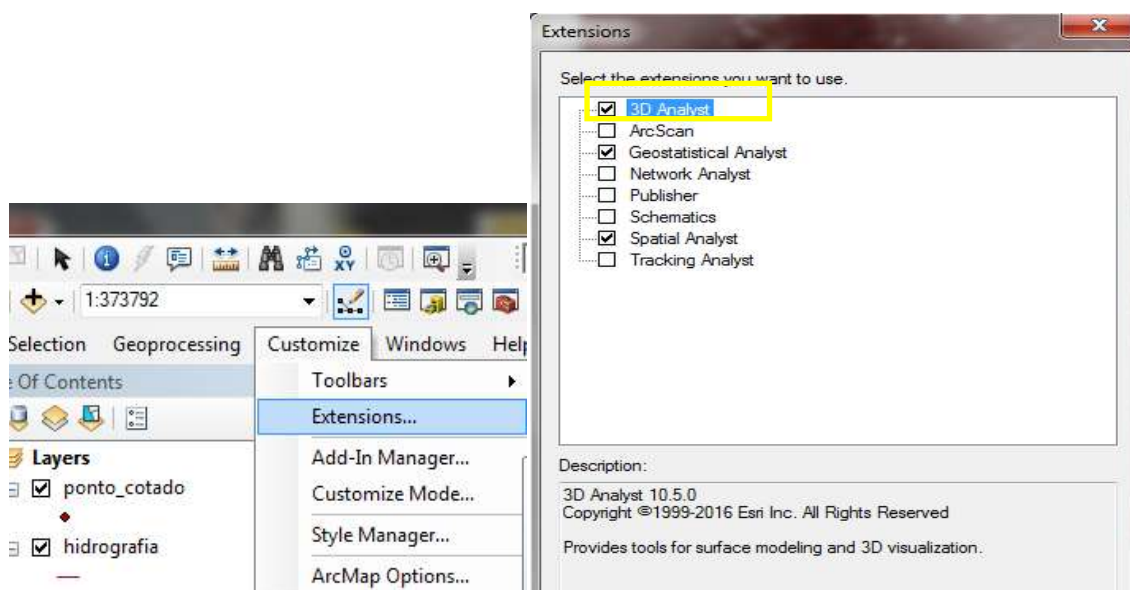
$$\text{IAF} = - \text{float} (\text{Ln} ((0.69 - \text{SAVI}) / 0.59)) / \text{Float} (0.91)$$



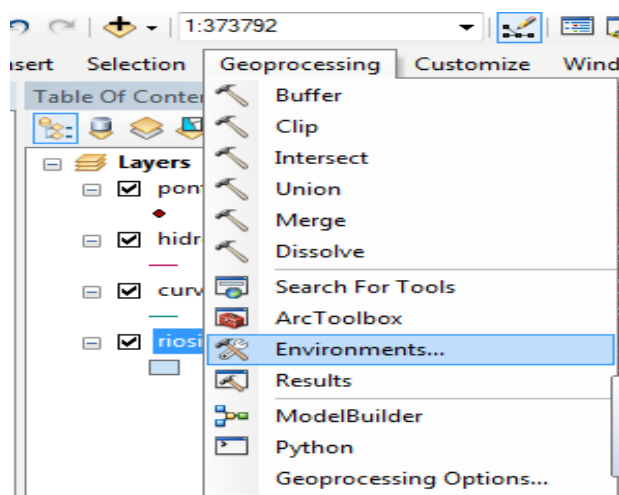
- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.

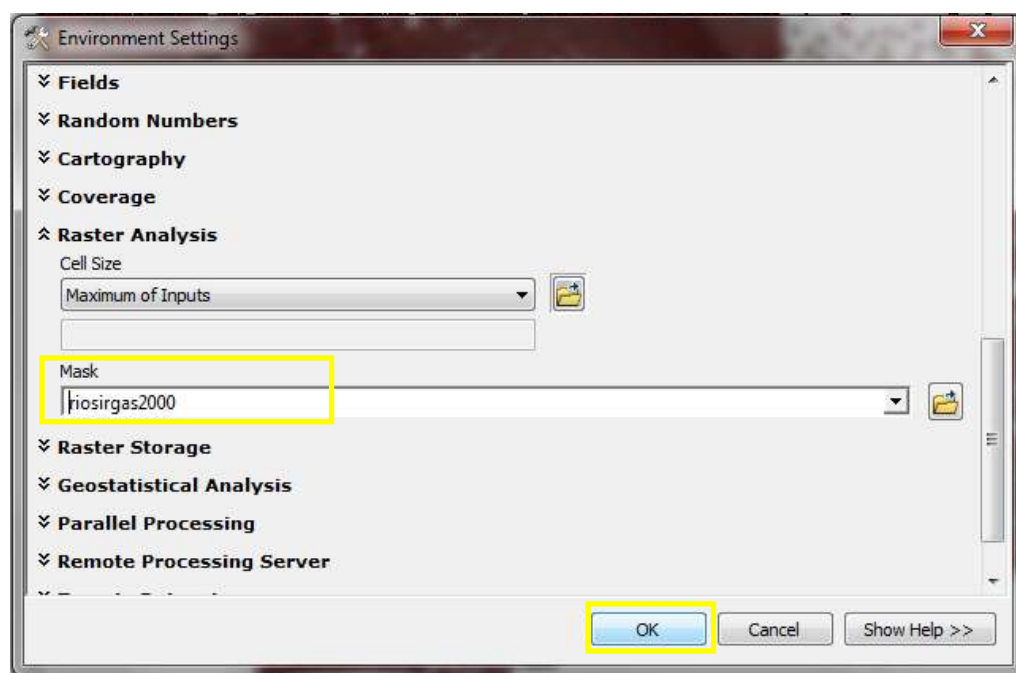
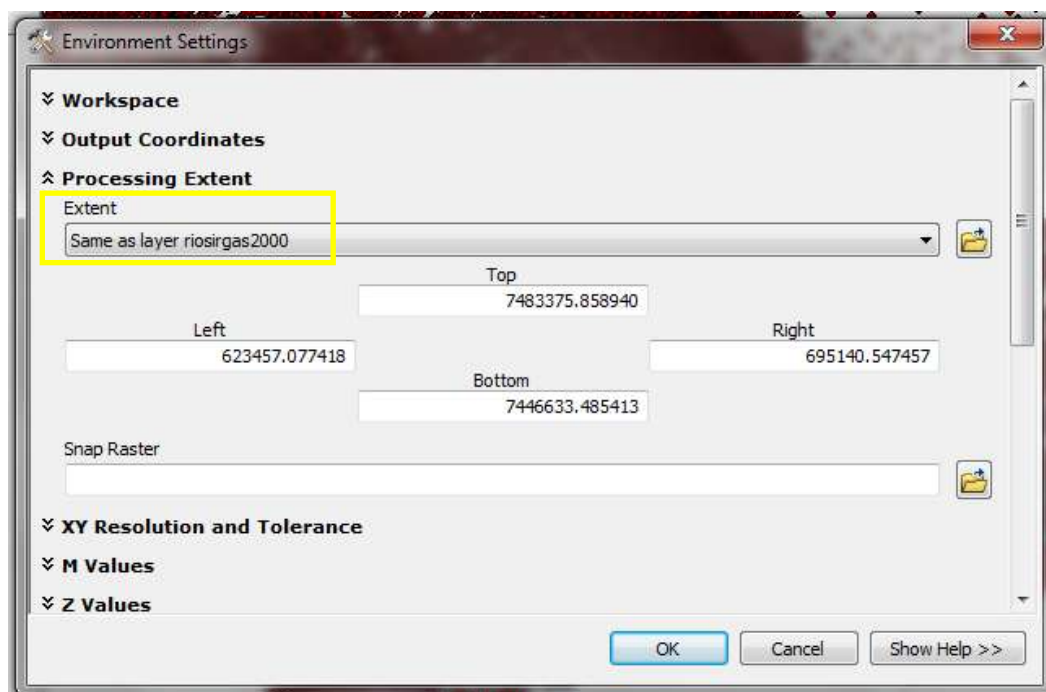
APÊNDICE O – Tutorial: Interpolador Topo To Raster No Software Arqgis 10.5 - MDT HC

1º Etapa: Verifique em **Customize** → **Extension** se o **3D Analyst** se encontra ativado. Caso esteja desativado é necessário ativá-lo.



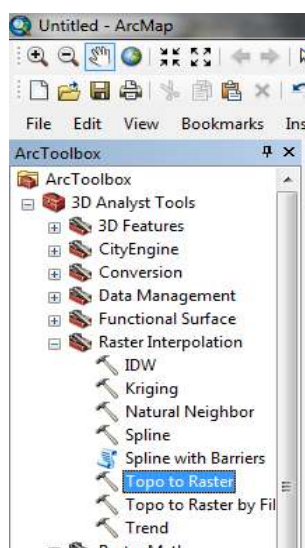
2º Etapa: Em **Geoprocessing** → **Environments...** é necessário traçar as delimitações para que o MDT-HC gerado não extrapole a área de estudo. Uma janela abrirá. Nesta janela, será necessário, na aba **Processing Extent** acrescentar seu vetor de delimitação em **Extent**. Depois se dirija a aba **Raster Analyst**, onde em **mask** novamente será necessário acrescentar seu vetor de delimitação. Finalmente, aperte o **OK**.





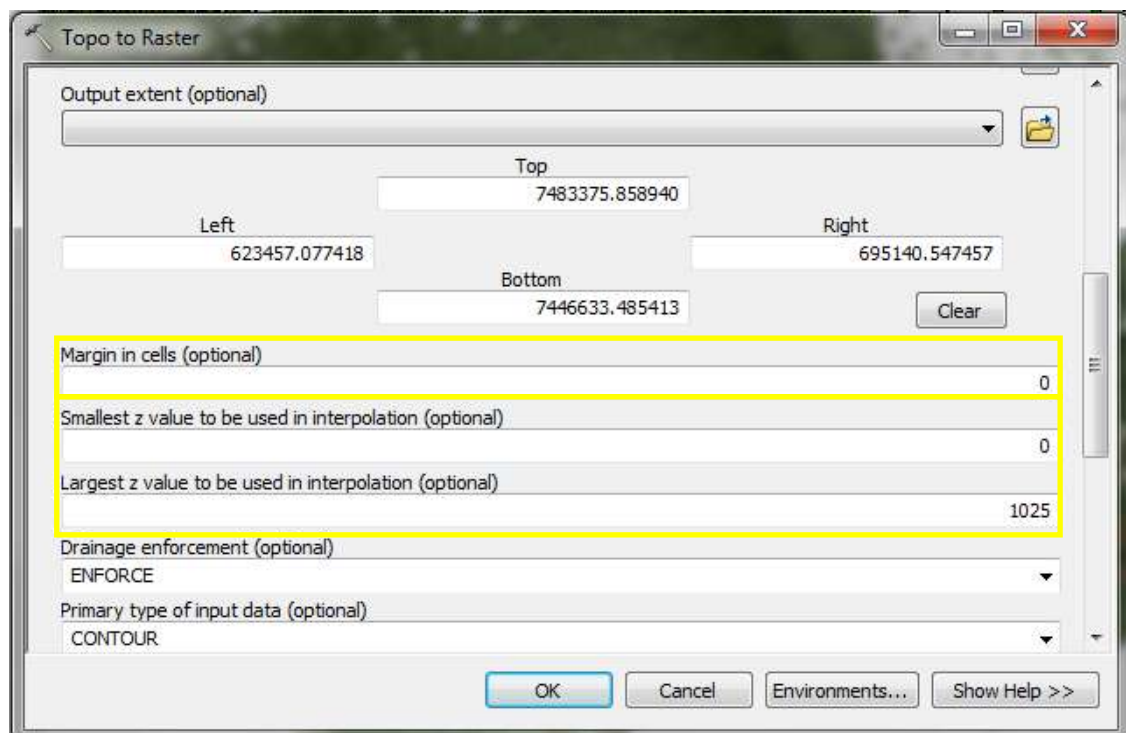
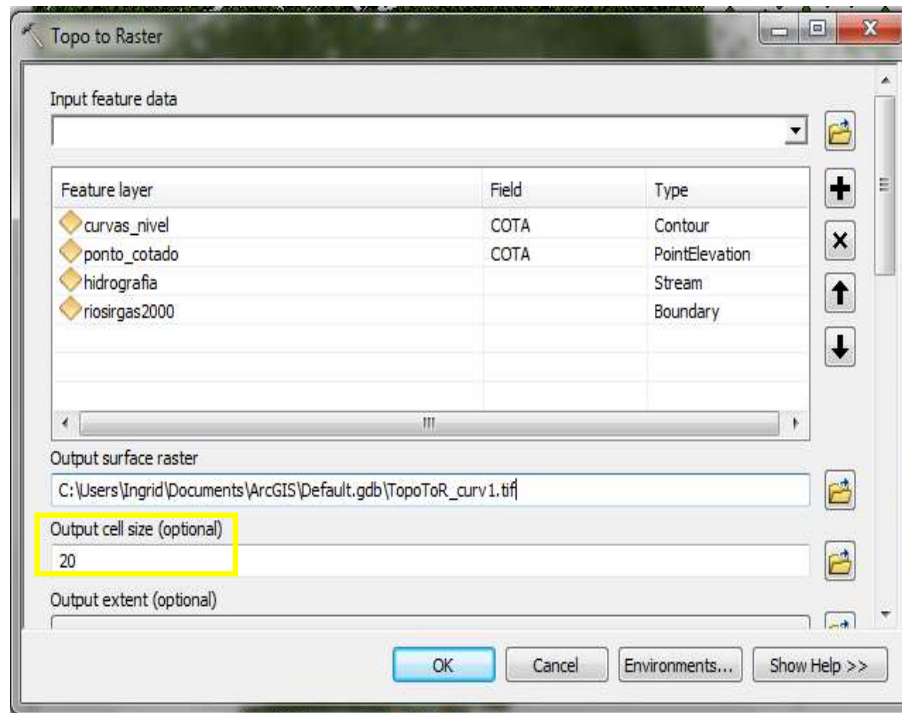
3º Etapa: Em *ArcToolbox*, seguir o caminho **3D Analyst Tools** → **Raster Interpolation** → **Topo to Raster**. Uma janela abrirá. Insira as seguintes padronizações:

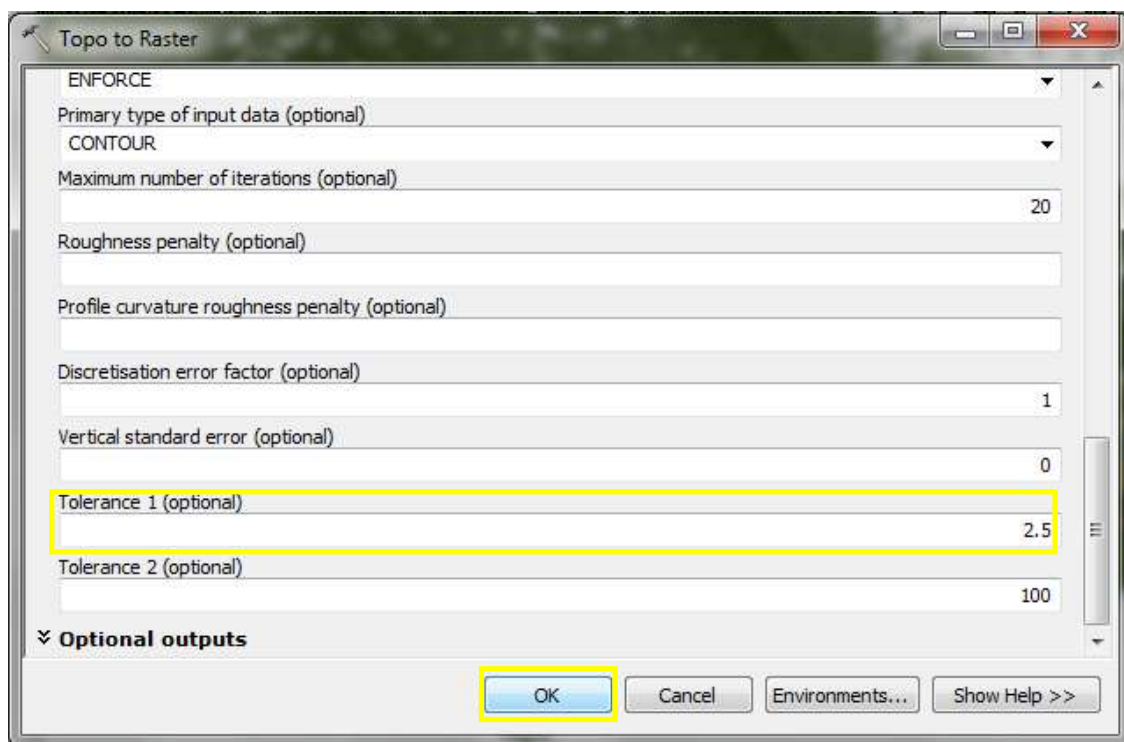
- **Input feature data** – Selecioneos dados de entrada de curvas de nível (**Field – COTA** (campo com altimetria)/**Type – Contour**), ponto cotado (**Field – COTA** (campo com altimetria)/**Type – PointElevtion**), hidrografia (**Type – Stream** (córrego)) e vetor para delimitação do retângulo envolvente do nosso raster (**Type – Boundary** (delimitação)).
- **Output cell size (optional)** – Escolha a pasta e nomear o arquivo. Importante de acrescentar o .TIF junto ao nome do arquivo para que o raster gerado tenha esta extensão.
- **Output cell size (optional)** – Insira 20. Isso decorre dos dados do IBGE serem extraídos do MDS de resolução espacial de 20 m. Mas, por que usar os dados do IBGE (1:25.000) para especificar a resolução espacial da célula de saída? Devido a convenção da multiescalaridade que estabelece que é necessário utilizar como referência o dado de menor escala. Caso não se saiba a respeito da resolução da criação dos dados, será necessário seguir critérios para estipulações, como baseado na complexidade do terreno ou pelo calculo de resolução espacial do IBGE.



- **Margin cells (optional)** – Inserir valor 0. Isso decorre para que não haja extrapolações dos dados da interpolação fora da área já delimitada.
- **Smallest z value to be used in interpolation (optional)** – Insira o valor mínimo da COTA verificado dentre os dados de altimetria da curva de nível e ponto cotado.

- ***Largest z value to be used in interpolation (optional)*** – Insira o valor máximo da COTA verificado dentre os dados de altimetria da curva de nível e ponto cotado.
- ***Tolerance 1 (optional)***: Obrigatoriamente deverá ser metade do valor da equidistância das curvas de nível.

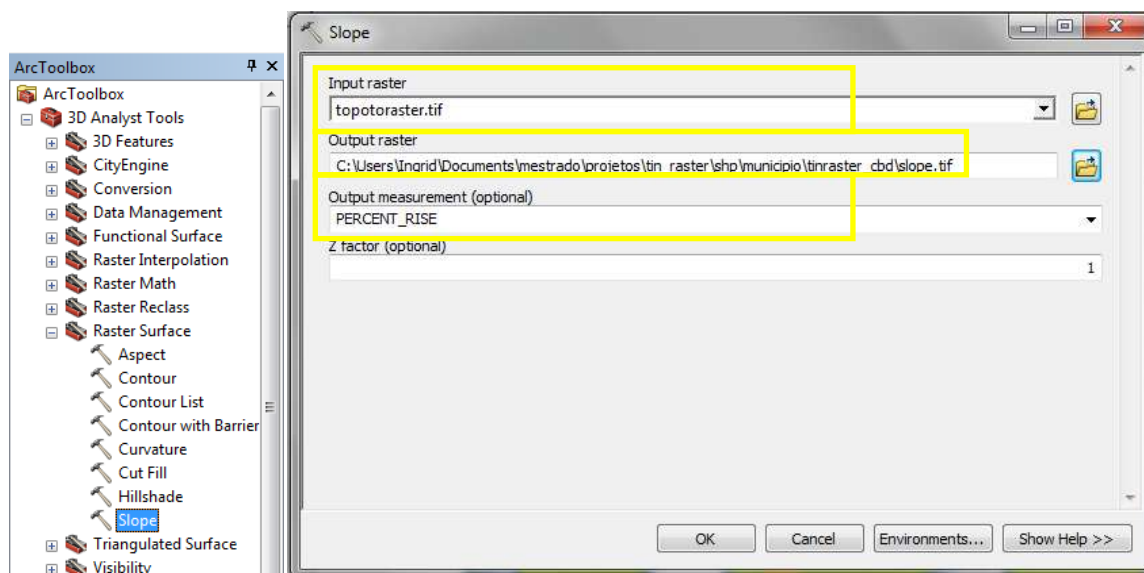




4º Etapa: Acione o **OK**.

APÊNDICE P – Tutorial: Slope No *Software Arcgis 10.5* – Declividade Das Vertentes

1º Etapa: Ative a ferramenta **Slope** em **ArcToolbox** → **3D Analyst Tools** → **Raster Surface** → **Slope**. Uma janela abrirá.



As etapas obrigatórias para a ferramenta **Slope** são: **Input raster** e **Output raster**; e as opcionais são **Output Measurement** e **Z-Factor**. Cada uma destas etapas será descrita.

2º Etapa: Insira as seguintes padronizações abaixo.

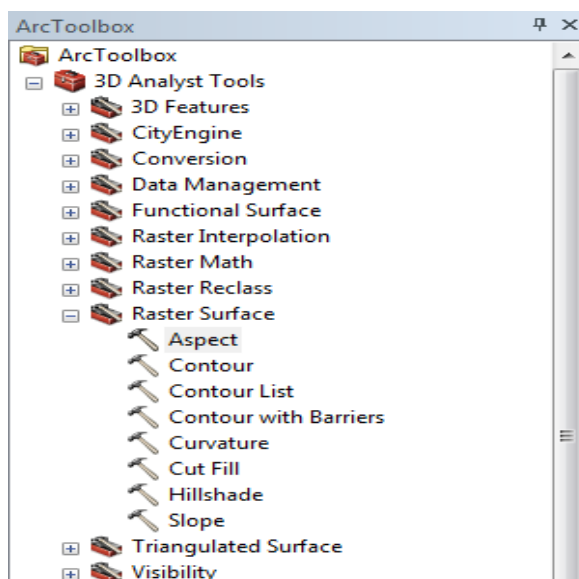
- **Input raster** – Insira o arquivo de entrada, o qual servirá de base para o processamento da informação (topotoraster.tif).
- **Output raster** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.
- **Output Measurement** - Escolha o tipo de cálculo da declividade a ser elaborado. Existem duas opções de escolha, a primeira é **Degree (Graus)** e a outra é **Percent_Rise (porcentagem)**.

- **Degree (Graus)**: Selecionando esta opção, o resultado final será calculado em graus, nesse caso, o arquivo matricial de entrada poderá estar tanto em coordenadas geográficas quanto em coordenadas planas.
- **Percent_Rise (porcentagem)**: Selecionando esta opção, o resultado final será calculado em porcentagem, nesse caso, o arquivo matricial de entrada deverá estar obrigatoriamente num sistema de coordenadas planas, caso contrário não será possível gerar a imagem.
- **Z-Factor** - NÃO MEXEREMOS NO Z-FACTOR. O fator z é um fator de escala utilizada para converter valores de elevação por dois motivos:
 - Para converter as unidades de elevação para a mesma unidade do sistema de coordenadas horizontais do projeto (FREY, 2007). Isto ocorre devido a diferença entre as unidades de medidas (horizontais e verticais);
 - Para agregar um exagero vertical, almejando um efeito visual.

3º Etapa: Finalmente **OK**.

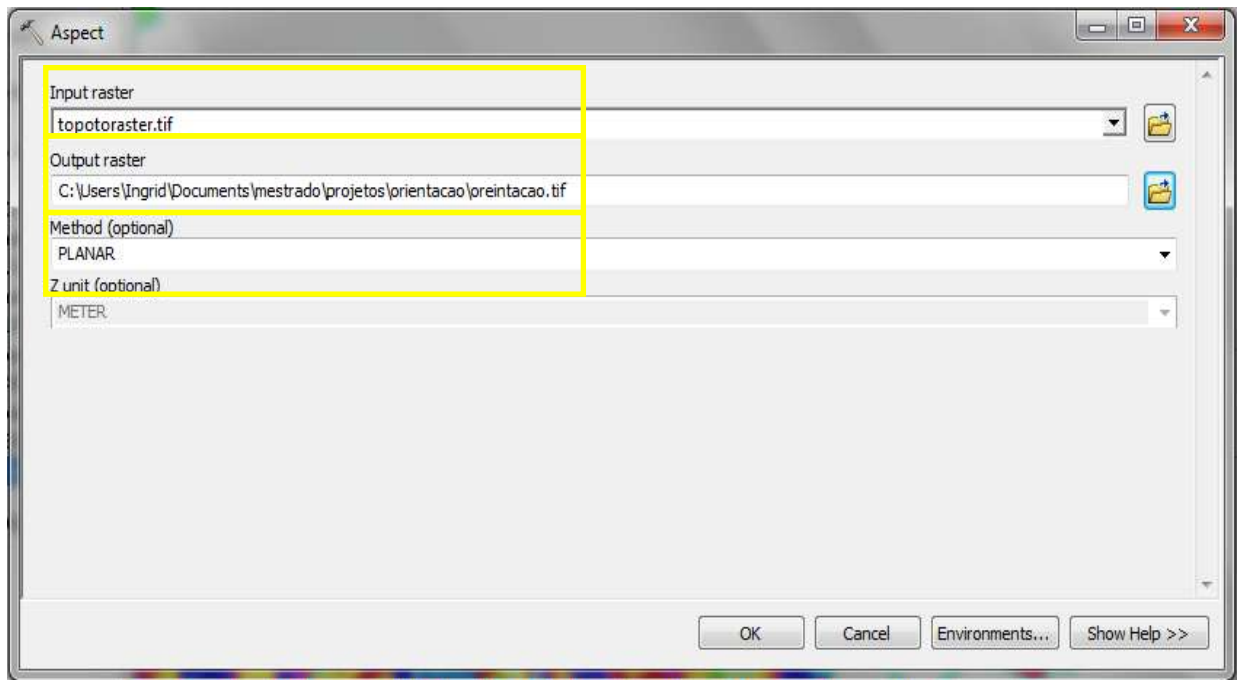
APÊNDICE Q – Tutorial: *Aspect* No *Softwre Arcgis* 10.5 Para Orientação Da Declividade

1º Etapa: Ative a ferramenta ***Aspect*** em ***ArcToolbox*** → ***3D Analyst Tools*** → ***Race Surface*** → ***Aspect***.



2º Etapa: Uma janela abrirá. Insira as seguintes padronizações:

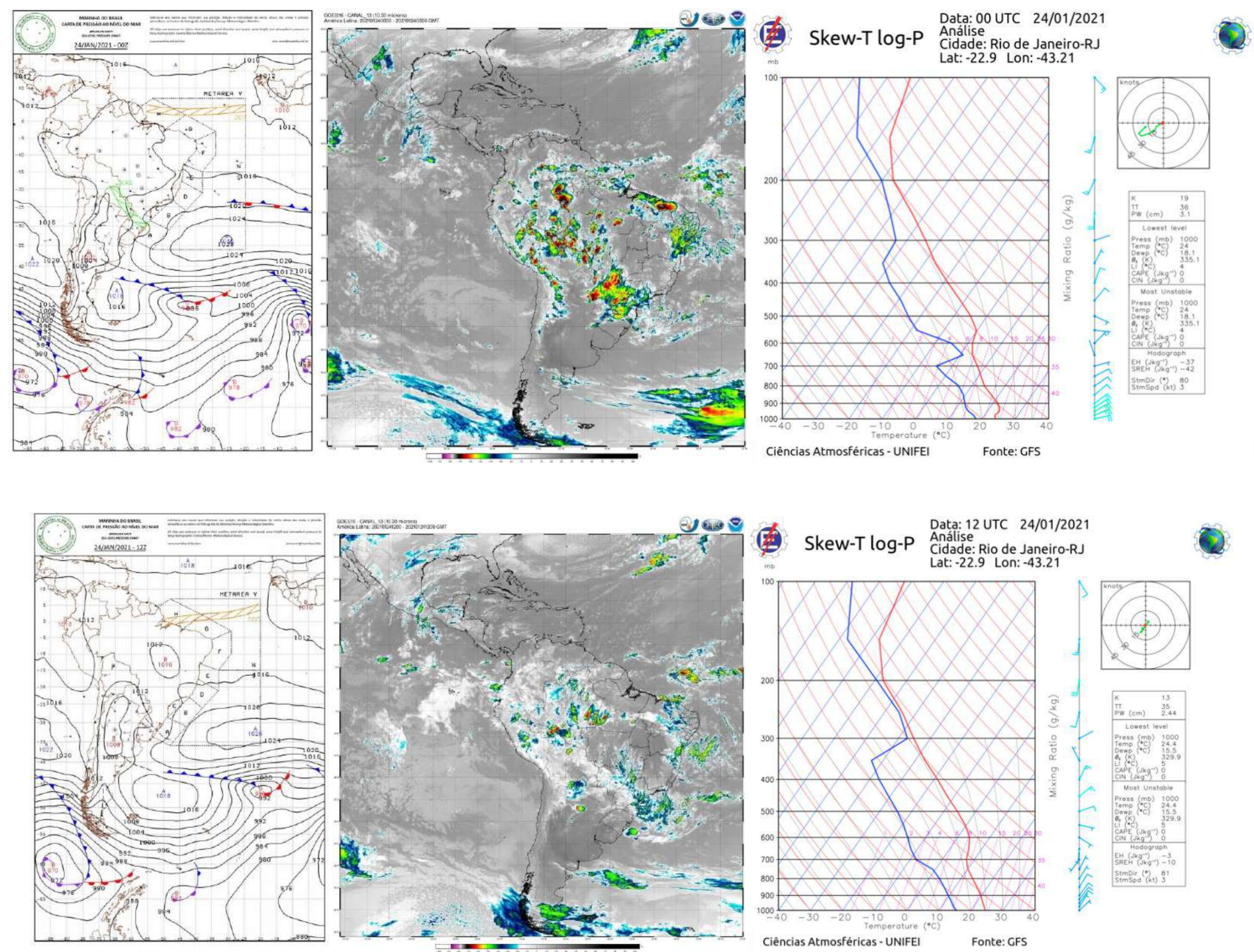
- ***Input raster*** – Insira o arquivo de entrada, o qual servirá de base para o processamento da informação (topotoraster.tif).
- ***Output raster*** – Escolha o local de destino, o nome e a extensão (.TIF) do arquivo de saída.
- ***Method (optional)*** – Insira “Planar”, em função de topotoraster.tif apresentar as referências espaciais de Sistema de Coordenadas Projetadas – UTM.

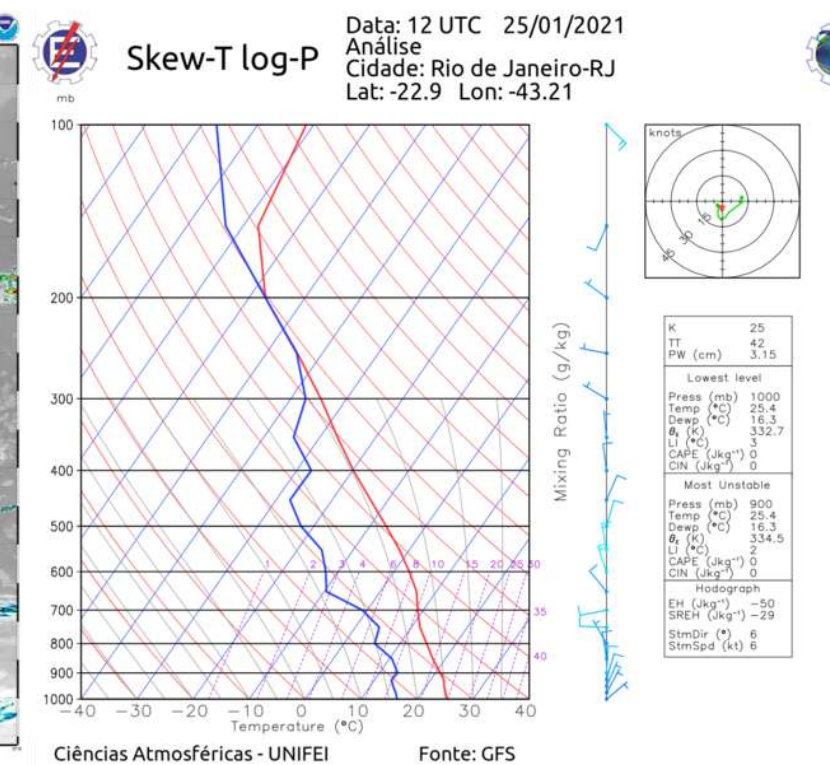
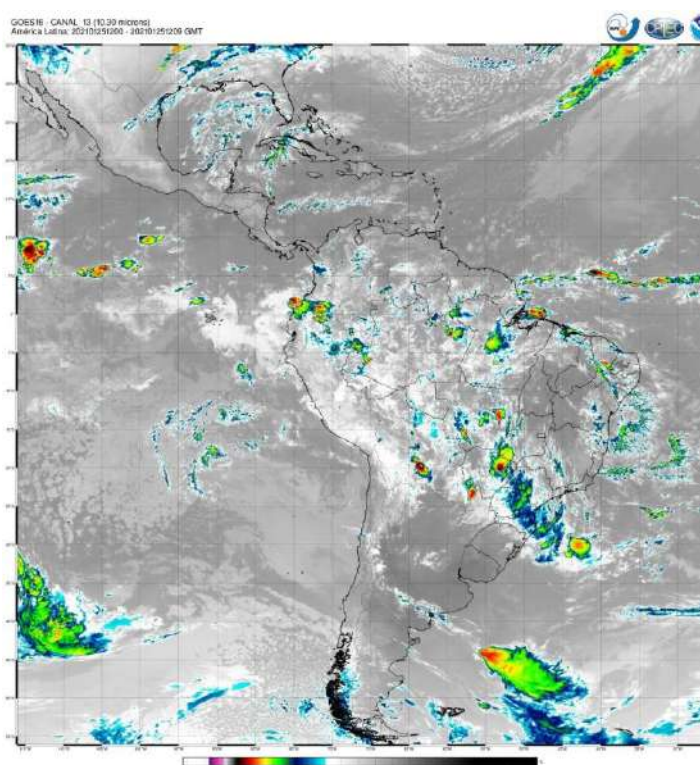
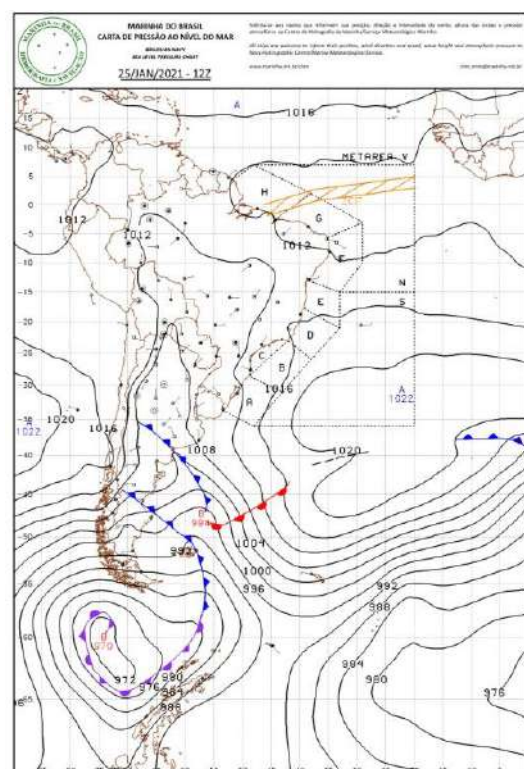
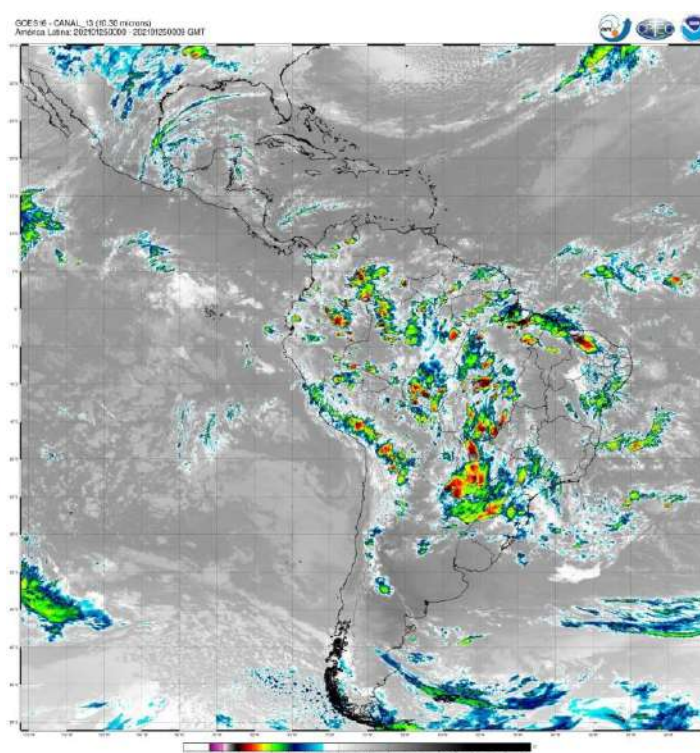


3º Etapa: Finalmente **OK**.

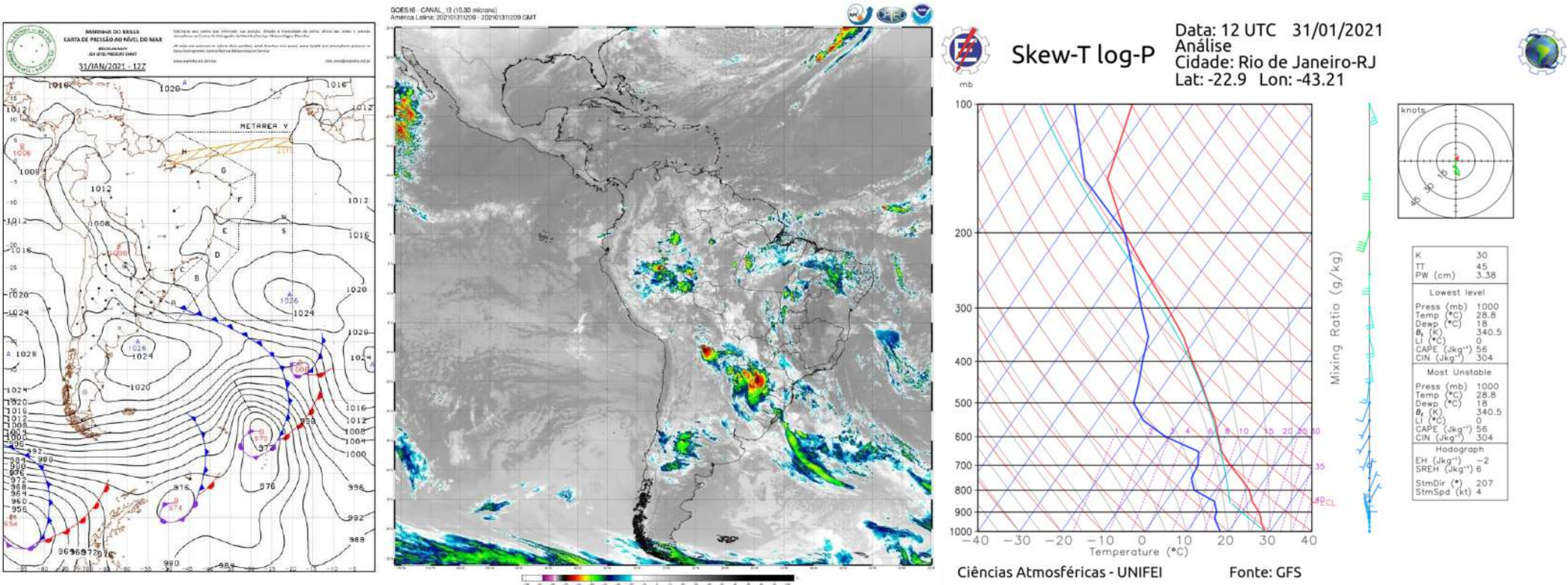
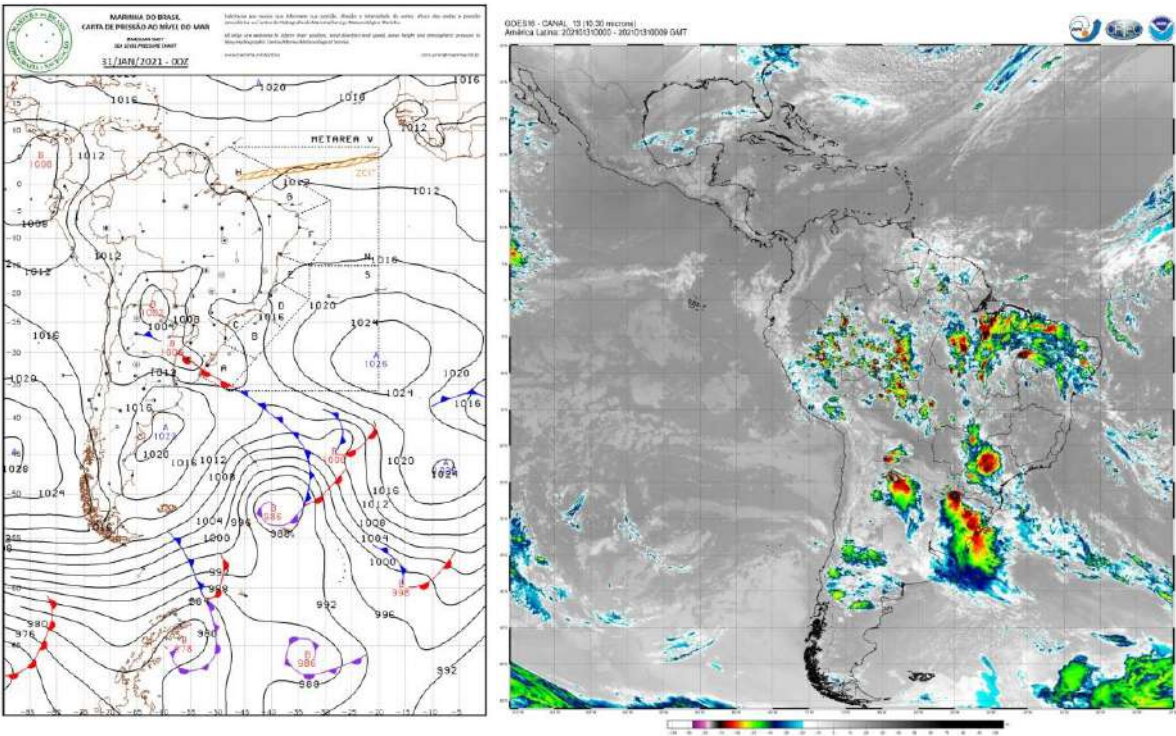
ANEXO A – Cartas Sinóticas, Imagens Goes 16 E Radiossondas Das Situações De Estabilidade Atmosférica.

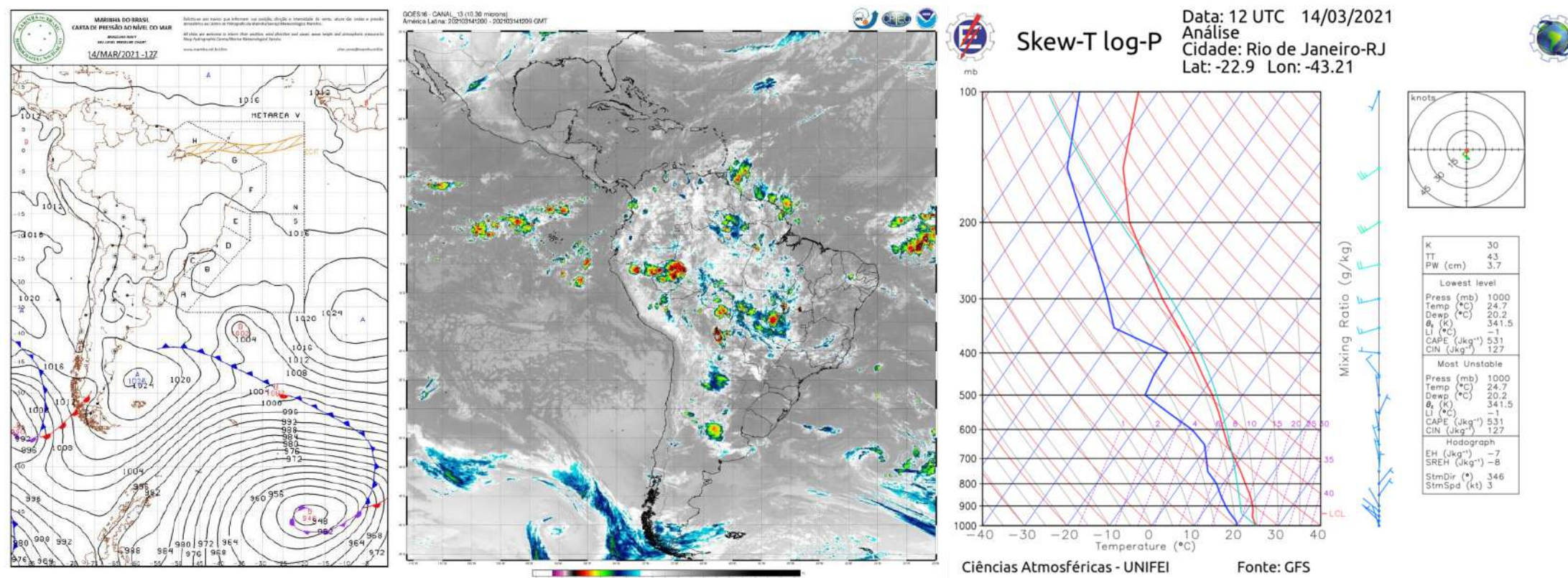
24/01/2021



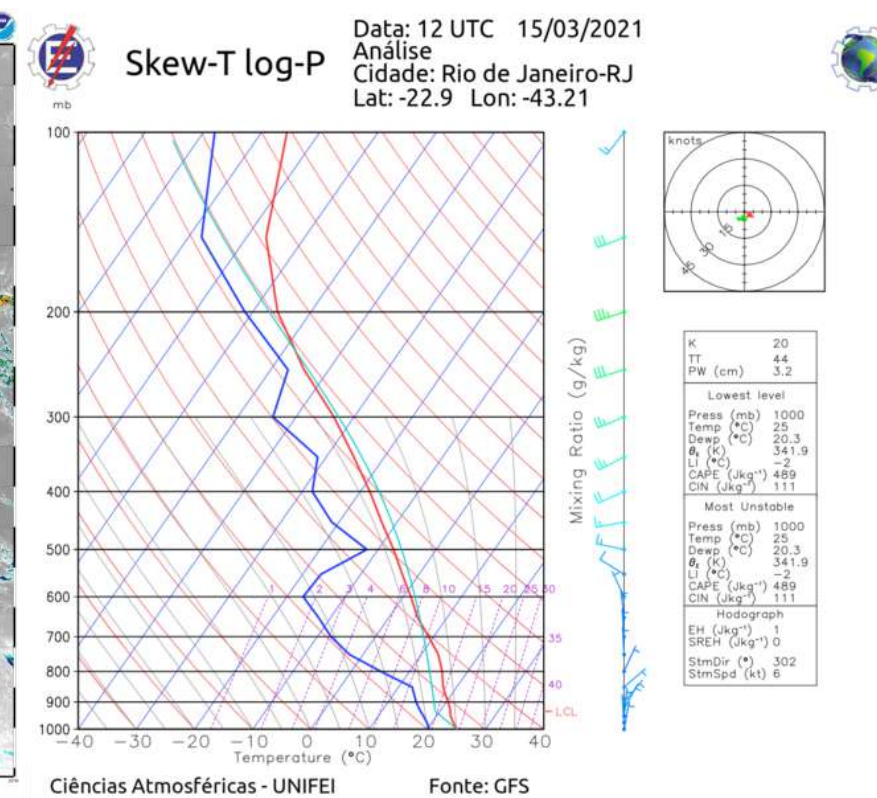
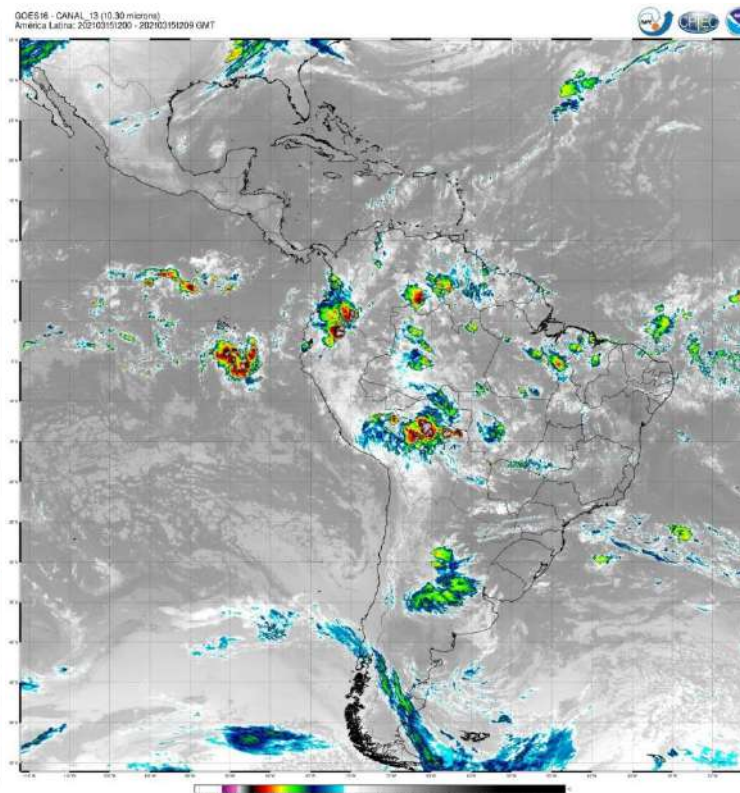
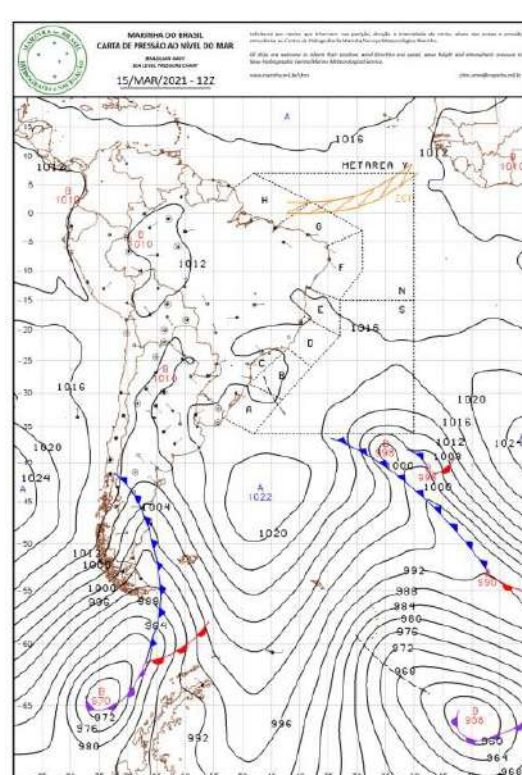
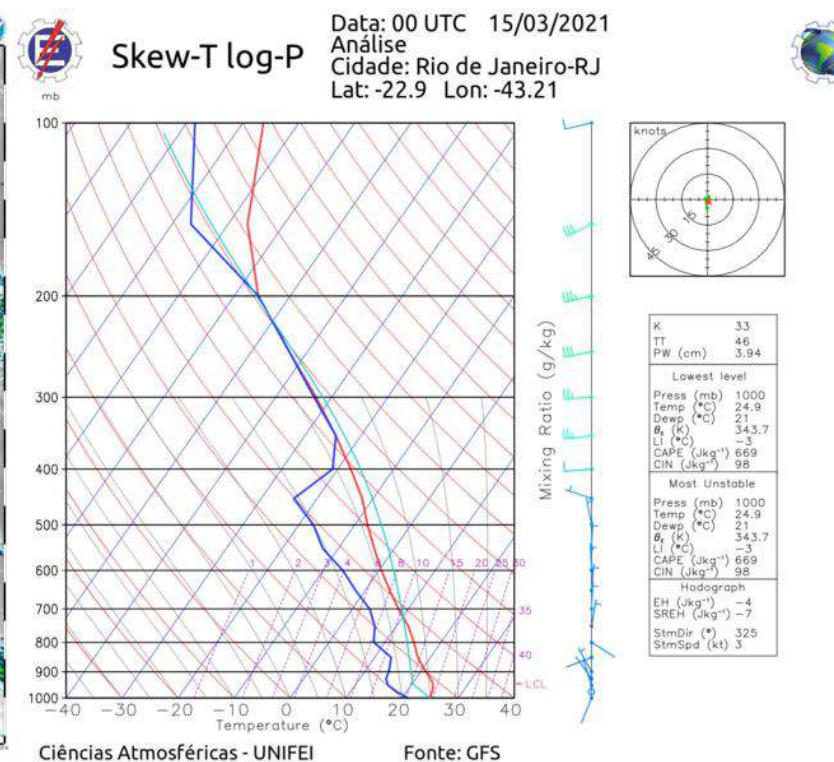
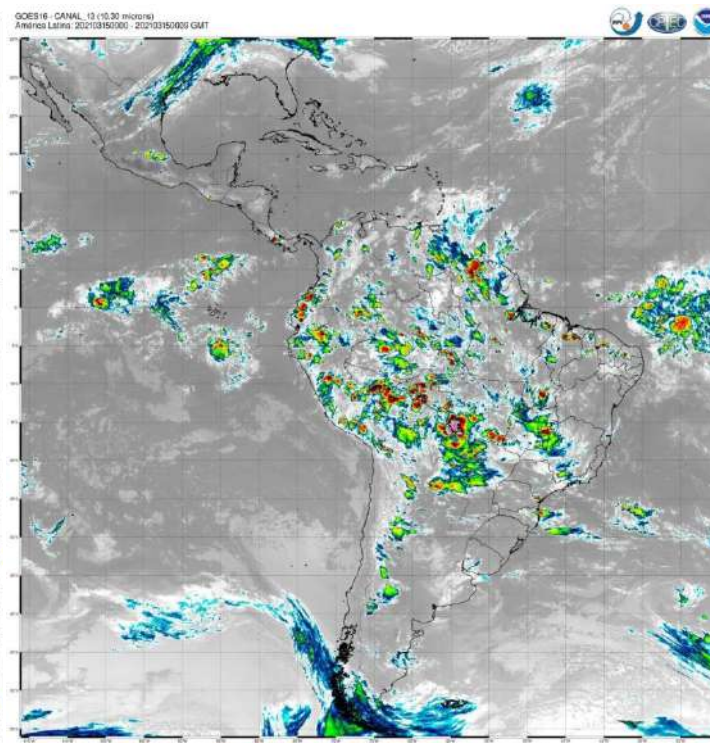
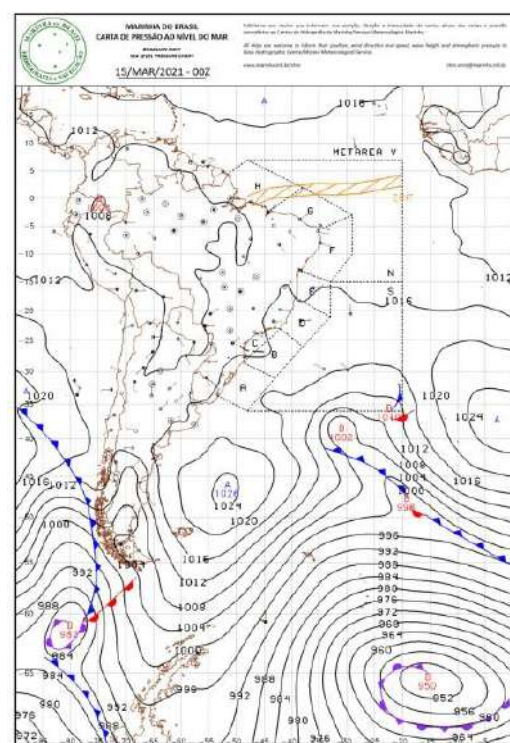


31/01/2021



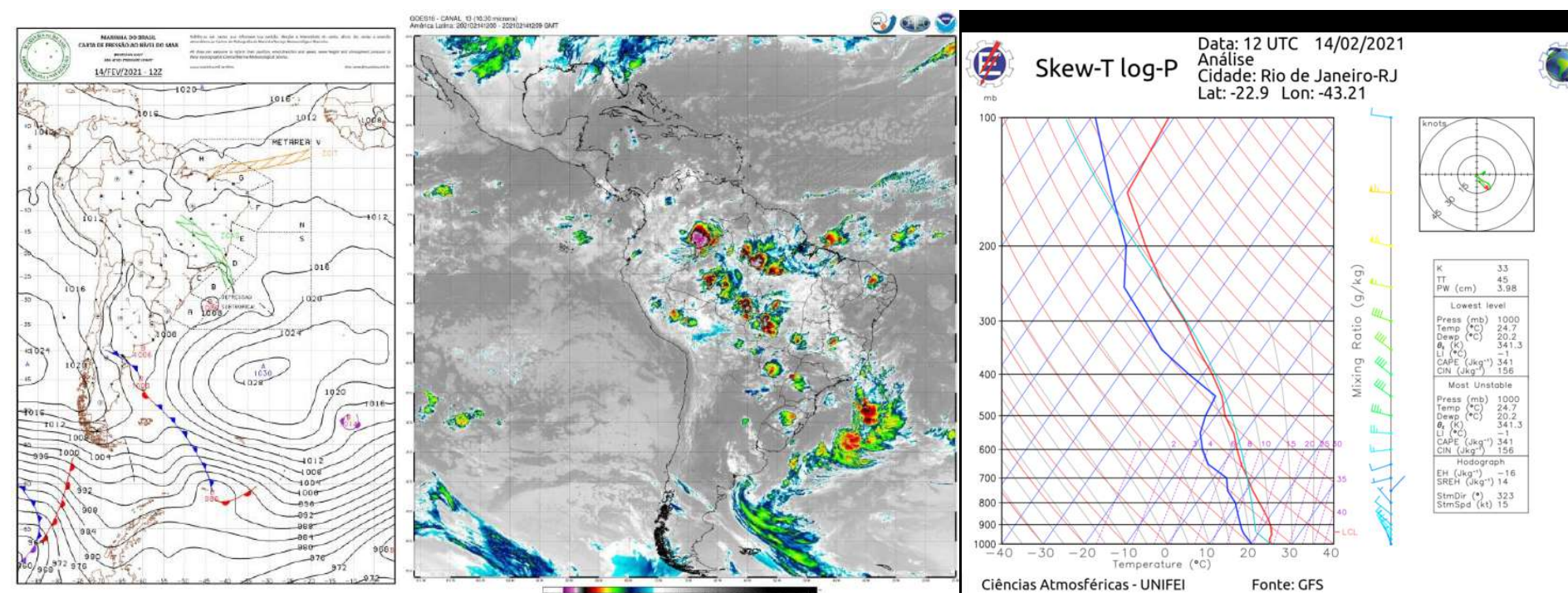
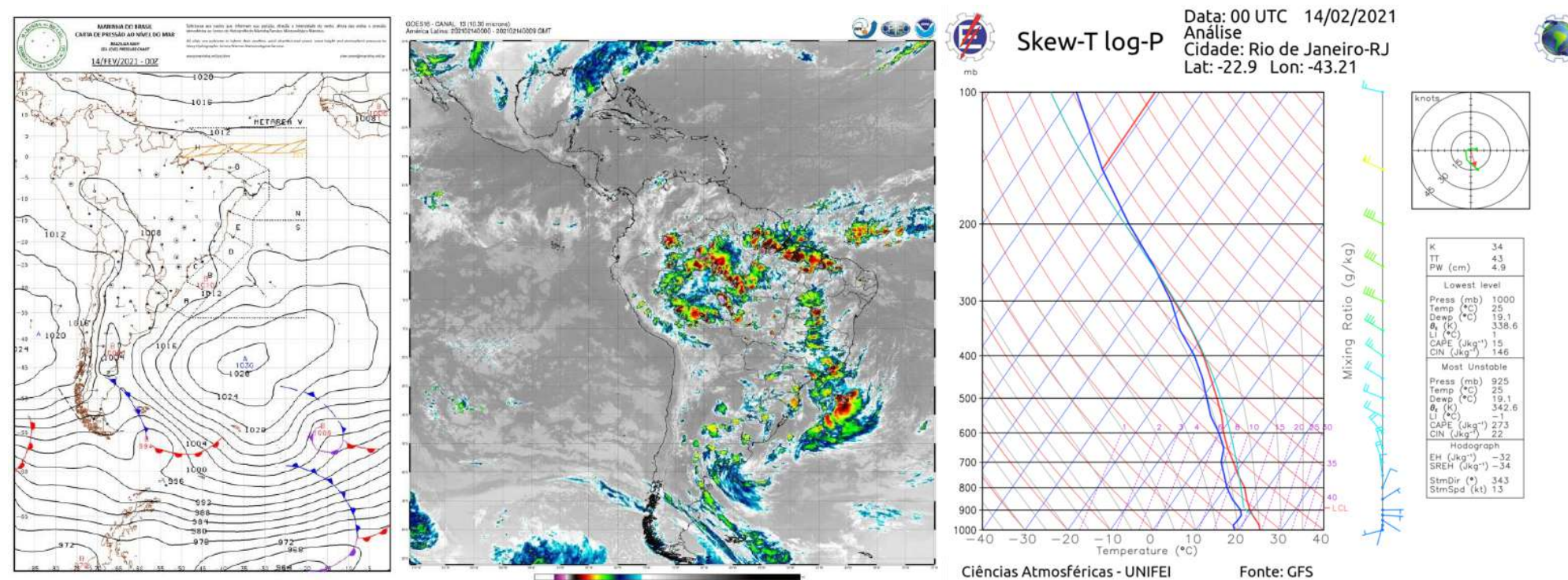


15/03/2021

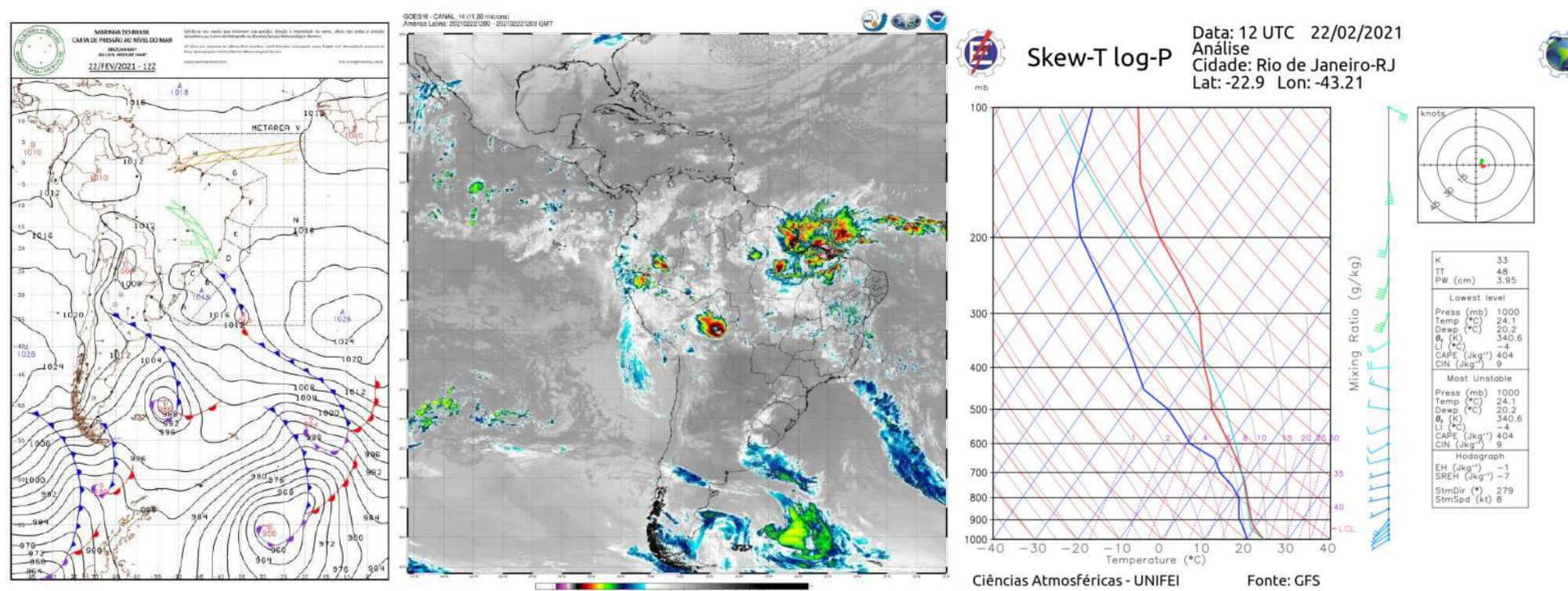
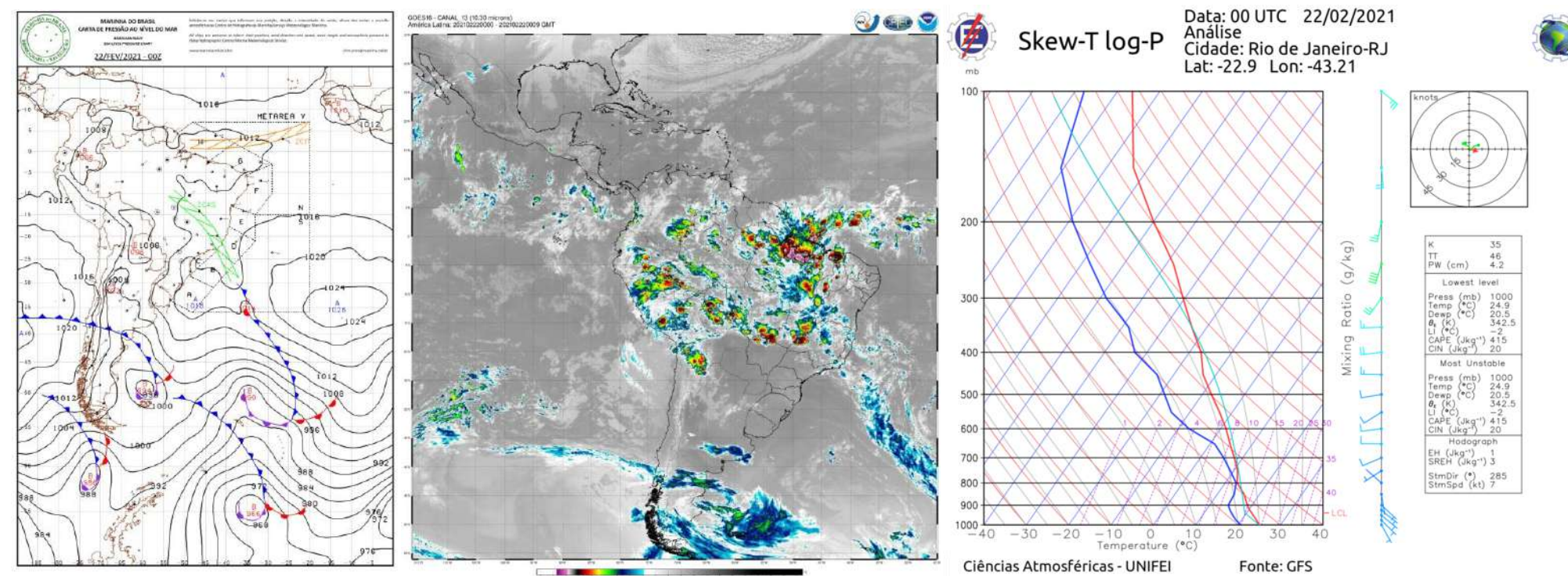


ANEXO B – Cartas Sinóticas, Imagens Goes 16 E Radiossondas Das Situações De Instabilidade Atmosférica.

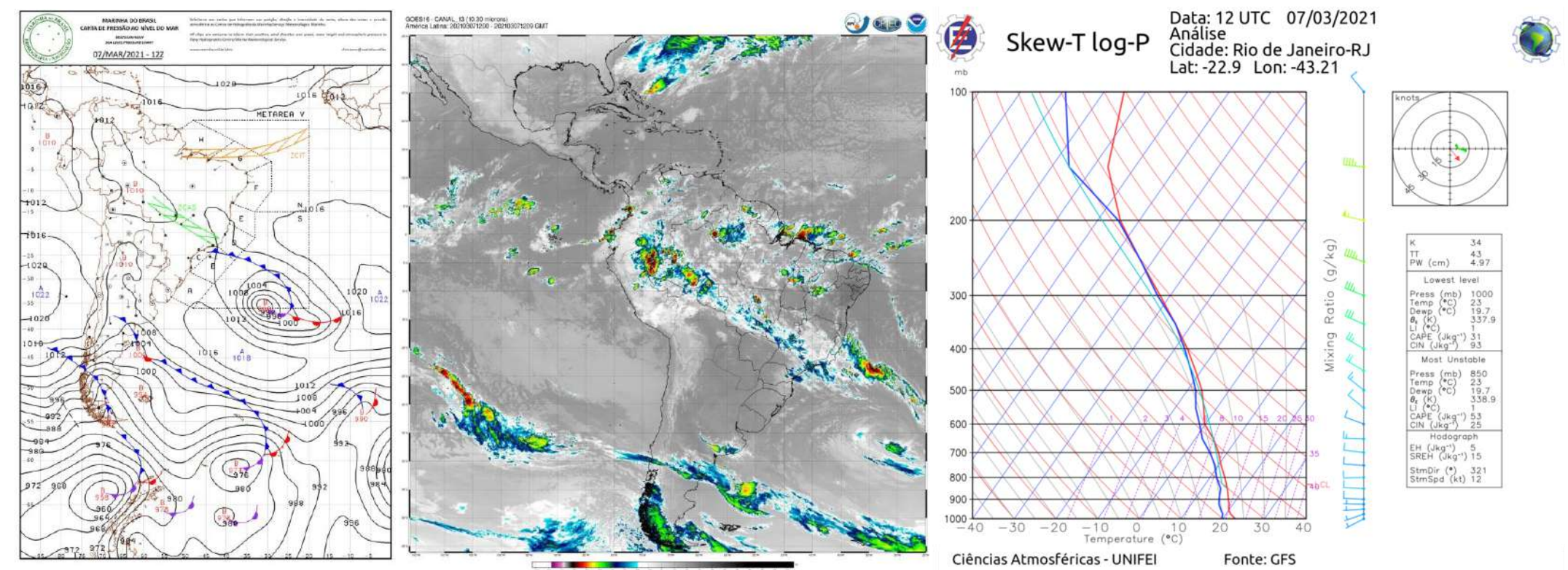
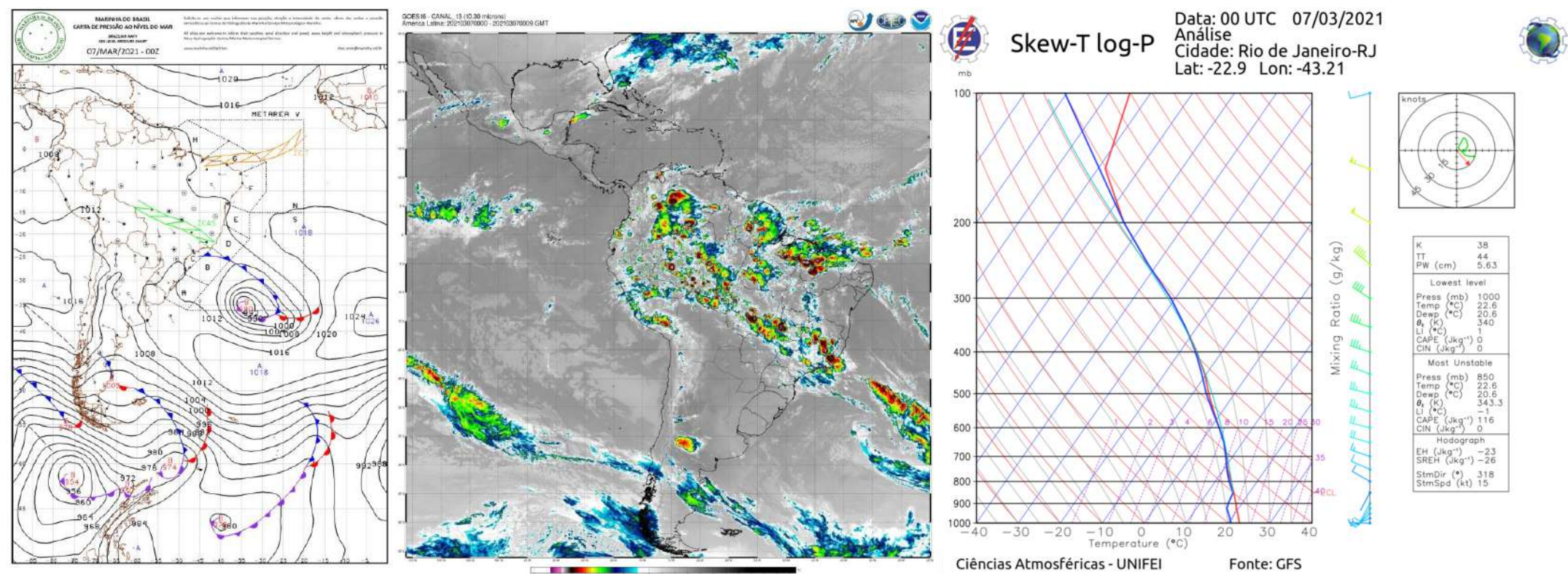
14/02/2021



22/02/2021

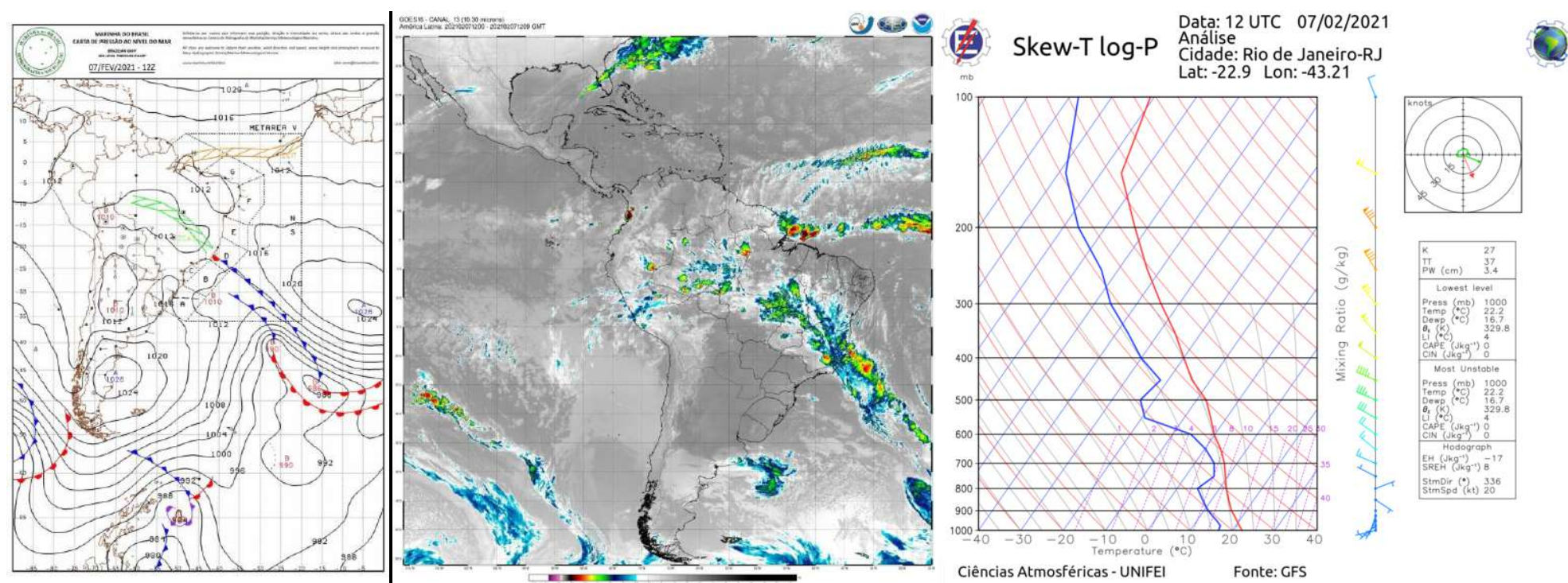
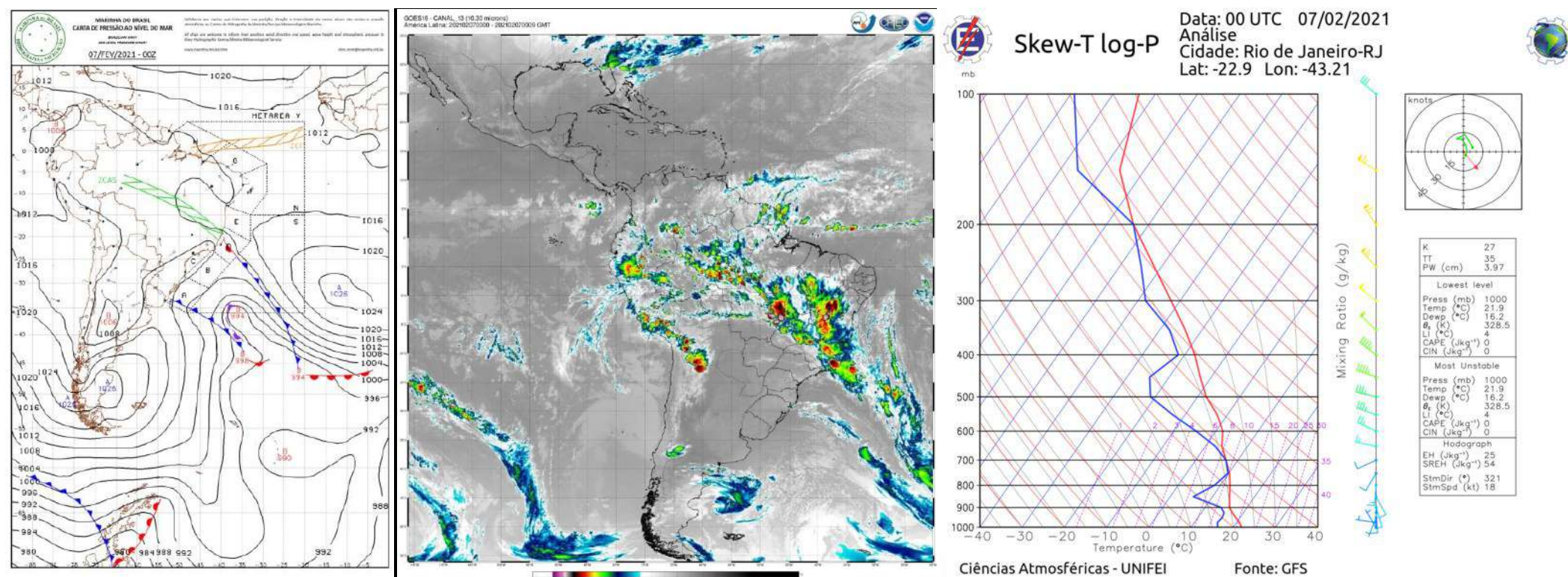


07/03/2021

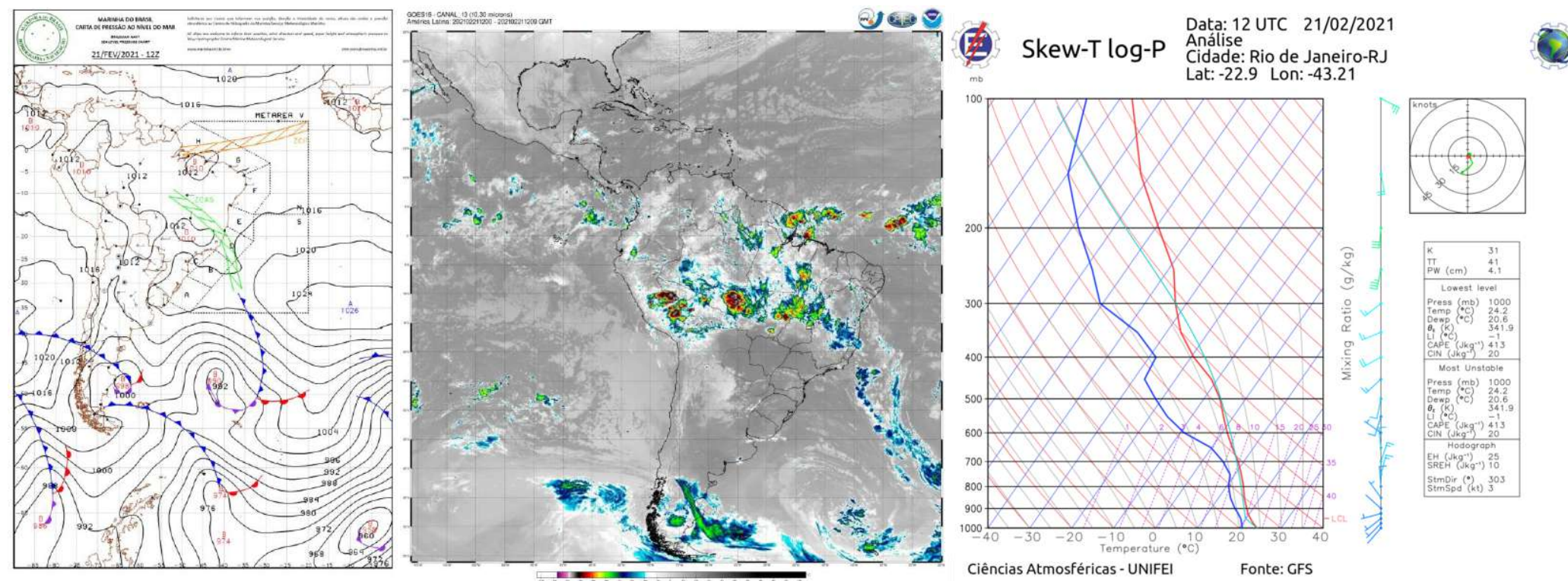
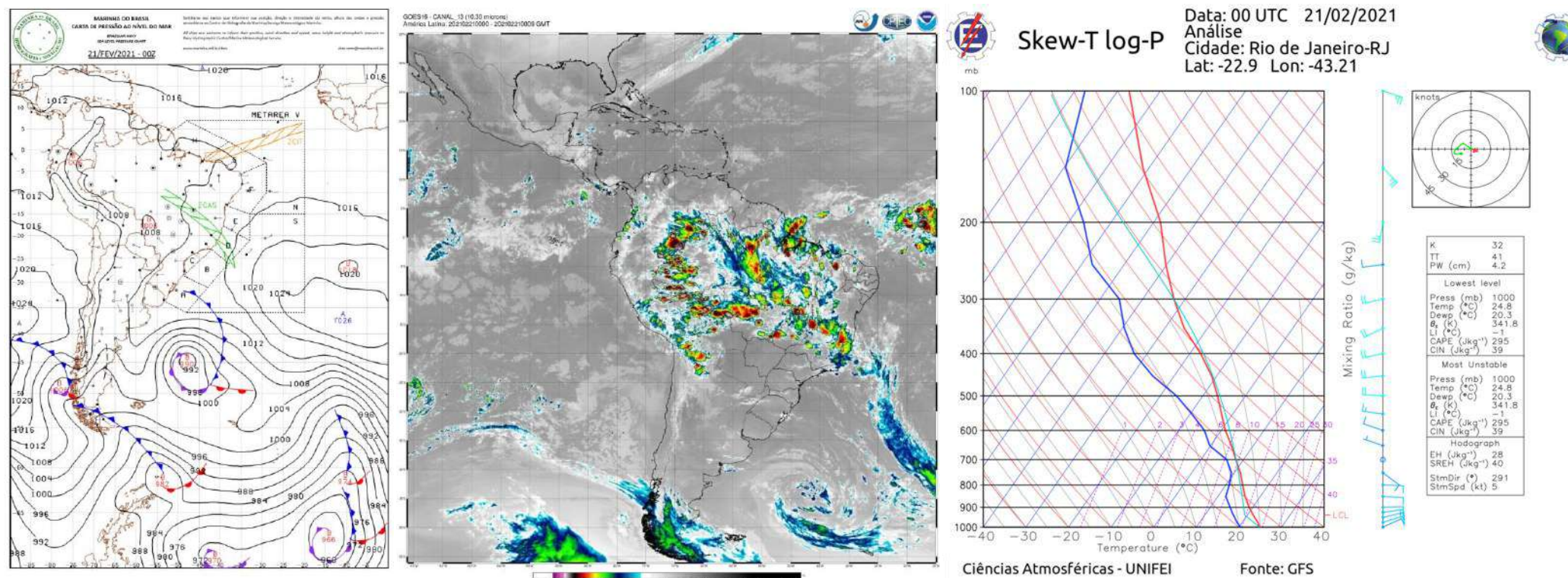


ANEXO C – Cartas Sinóticas, Imagens Goes 16 E Radiossondas Das Situações Pós-Instabilidade Atmosférica.

07/02/2021



21/02/2021



ANEXO D – Certificados De Calibração

TECNO CALIBRAÇÃO | **LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO** | **CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO** | **Nº 18972/20** | **PV Nº 0021042**

SOLICITANTE: Antonio Carlos Oscar Júnior
ENDEREÇO: RUA ANDRADE PERTENCE, 15 - CATETE - RIO DE JANEIRO - RJ

1. **Instrumento:** Estação Meteorológica
Fabricante: NOVOTEST
Modelo: N1041
Série: Não consta

TAG / Identificação: 18972/20
Faixa de Medição Interna: 0 a 50 °C / 10 a 99 % UR
Faixa de Medição Externa: -40 a 95 °C / 10 a 99 % UR
Faixa de Medição: 0 a 44,44 m/s
Resolução: 0,1 °C / 1% UR
0,1 m/s

2. **Método de Calibração:**
O instrumento foi calibrado por método comparativo com padrões relacionados no item 5. Os valores de indicação foram referenciados no instrumento e a tendência foi obtida através da diferença entre as leituras do instrumento em teste e os valores lidos no Padrão. Baseado em nossa Instrução de Calibração: Termo-higrômetro REV.00 e Anemômetro REV.00

3. **Temperatura durante a calibração:** 21,0 ± 3 °C

4. **Local da Calibração:** Tecnolab Serviços Ltda
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - Pompeia - São Paulo - SP - CEP: 05027-000

5. **Padrões Utilizados**
- Termohigrômetro Digital, nosso nº TEC-086, certificado LV-04662-08888-20-R0 de 19/3/2020 calibrado por Visomes (RBC nº 127), válido até 3/2022.
- Termo-Anemômetro Digital, nosso nº TEC-077, certificado 110896 de 27/12/2019 calibrado por Chrompack, válido até 11/2023.

6. **Resultados da Calibração:**

6.1. **Temperatura Sensor Interno**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
10,0	9,2	0,8
20,0	19,1	0,9
30,0	29,1	0,9
40,0	39,1	0,9
50,0	49,1	0,9

6.2. **Temperatura Sensor Externo**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
10,0	10,0	0,0
20,0	19,9	0,1
30,0	29,9	0,1
40,0	39,9	0,1
50,0	49,9	0,1

6.3. **Umidade Sensor Interno**

Indicação (%UR)	Encontrado (%UR)	Tendência (%UR)
20	18,8	3,2
40	38,6	3,4
60	58,5	3,5
80	78,4	3,6

6.4. **Umidade Sensor Externo**

Indicação (%UR)	Encontrado (%UR)	Tendência (%UR)
20	20,4	-0,4
40	40,6	-0,6
60	60,7	-0,7
80	80,9	-0,9

6.5. **Velocidade do Vento**

Valor Indicado no Instrumento (m/s)	Valor Encontrado no Padrão (m/s)	Tendência (m/s)
0,0	0,00	0,00
2,0	1,98	0,02
4,0	3,96	0,04
8,0	7,90	0,04
12,0	11,96	0,04
16,0	15,91	0,09
19,0	18,91	0,09

7. **Incerteza de Medição:**
Temperatura Interna: U = 0,3 °C
Umidade Interna / Externa: U = 2,8 % UR
Velocidade do Vento: U = 0,29 m/s

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k=2,00, o que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.

Data da Calibração: 11/12/2020
Data de Emissão: 11/12/2020

Helio Hiroshi Okano
Helio Hiroshi Okano
Técnico Responsável

Notas:
1. Este certificado está de acordo com os termos do "Vocabulário Internacional de Metrologia" (VIM), em sua última revisão.
2. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer itens.
3. A reprodução total ou parcial deste certificado depende exclusivamente da aprovação por escrito da TECNOCALIBRAÇÃO.
4. Técnico Executante: Helio Hiroshi Okano.
5. Planta: Termo-higrômetro REV.00 de 25/05/2014.

Tecnocalibração - Calibração de instrumentos de medição
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - sala 01
Vila Anglo Brasileira - São Paulo, SP - CEP 05027-000
11 4861-4075 | comercial@tecnocalibração.com.br | www.tecnocalibração.com.br

TECNO CALIBRAÇÃO | **LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO** | **CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO** | **Nº 4240/21** | **PV Nº 0021335**

SOLICITANTE: ANTONIO CARLOS DA S. OSCAR JÚNIOR/FAPERJ
ENDEREÇO: RUA ANDRADE PERTENCE, 15 - APTO 602 - CATETE - RIO DE JANEIRO - RJ

1. **Instrumento:** Termo-Anemômetro Digital
Fabricante: Incoterm
Modelo: TAN 050
Série: 15039647

TAG / Identificação: -10 a 45 °C
Faixa de Medição: 0 a 30 m/s
Resolução: 0,1 °C
0,01 m/s

2. **Método de Calibração:**
O instrumento foi calibrado pelo método comparativo com os padrões relacionados no item 5, os resultados foram obtidos através da média de três medições diretas no instrumento. Baseado em na Instrução de calibração: Termohigrômetro REV.00 e Anemômetro REV.00

3. **Temperatura durante a calibração:** 21 ± 3 °C

4. **Local da Calibração:** Tecnocalibração Serviços Ltda
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - Pompeia - São Paulo - SP - CEP: 05027-000

5. **Padrões Utilizados**
- Termohigrômetro Digital, nosso nº TEC-086, certificado LV-04662-08888-20-R0 de 19/3/2020 calibrado por Visomes (RBC nº 127), válido até 3/2022.
- Termo-Anemômetro Digital, nosso nº TEC-077, certificado 110896 de 27/12/2019 calibrado por Chrompack, válido até 12/2023.

6. **Resultados da Calibração:**

6.1. **Anemômetro**

Valor Indicado no Instrumento (m/s)	Valor Encontrado no Padrão (m/s)	Tendência (m/s)
0,0	0,00	0,00
4,0	3,95	0,05
8,0	7,90	0,10
12,0	11,85	0,15
16,0	15,86	0,14
20,0	19,81	0,19

6.2. **Temperatura**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
10	10,0	0,0
20	19,9	0,1
30	29,9	0,1
40	39,9	0,1
50	49,9	0,1

7. **Incerteza de Medição:**
Temperatura Interna: U = 0,3 °C
Anemômetro: 0,19 m/s

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k=2,00, o que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.

Data da Calibração: 23/2/2021
Data de Emissão: 23/2/2021

Helio Hiroshi Okano
Helio Hiroshi Okano
Técnico Responsável

Notas:
1. Este certificado está de acordo com os termos do "Vocabulário Internacional de Metrologia" (VIM), em sua última revisão.
2. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer itens.
3. A reprodução total ou parcial deste certificado depende exclusivamente da aprovação por escrito da TECNOCALIBRAÇÃO.
4. Técnico Executante: Helio Hiroshi Okano.
5. Planta: Termo-Anemômetro REV.00.

Tecnocalibração - Calibração de instrumentos de medição
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - sala 01
Vila Anglo Brasileira - São Paulo, SP - CEP 05027-000
11 4861-4075 | comercial@tecnocalibração.com.br | www.tecnocalibração.com.br

TECNO CALIBRAÇÃO | **LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO** | **CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO** | **Nº 18969/20** | **PV Nº 0021042**

SOLICITANTE: Antonio Carlos Oscar Júnior
ENDEREÇO: RUA ANDRADE PERTENCE, 15 - CATETE - RIO DE JANEIRO - RJ

1. **Instrumento:** Termo-Anemômetro Digital
Fabricante: Incoterm
Modelo: TAN 050
Série: 15039685

TAG / Identificação: -10 a 45 °C
Faixa de Medição: 0 a 30 m/s
Resolução: 0,1 °C
0,01 m/s

2. **Método de Calibração:**
O instrumento foi calibrado pelo método comparativo com os padrões relacionados no item 5, os resultados foram obtidos através da média de três medições diretas no instrumento. Baseado em na Instrução de calibração: Termohigrômetro REV.00 e Anemômetro REV.00

3. **Temperatura durante a calibração:** 21 ± 3 °C

4. **Local da Calibração:** Tecnocalibração Serviços Ltda
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - Pompeia - São Paulo - SP - CEP: 05027-000

5. **Padrões Utilizados**
- Termohigrômetro Digital, nosso nº TEC-086, certificado LV-04662-08888-20-R0 de 19/3/2020 calibrado por Visomes (RBC nº 127), válido até 3/2022.
- Termo-Anemômetro Digital, nosso nº TEC-077, certificado 110896 de 27/12/2019 calibrado por Chrompack, válido até 11/2023.

6. **Resultados da Calibração:**

6.1. **Anemômetro**

Valor Indicado no Instrumento (m/s)	Valor Encontrado no Padrão (m/s)	Tendência (m/s)
0,0	0,00	0,00
4,0	3,89	0,11
8,0	7,87	0,13
12,0	11,86	0,14
16,0	15,83	0,17
20,0	19,82	0,18

6.2. **Temperatura**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
10	9,9	0,1
20	19,8	0,2
30	29,8	0,2
40	39,8	0,2
50	49,8	0,2

7. **Incerteza de Medição:**
Temperatura Interna: U = 0,3 °C
Anemômetro: 0,19 m/s

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k=2,00, o que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.

Data da Calibração: 11/12/2020
Data de Emissão: 11/12/2020

Helio Hiroshi Okano
Helio Hiroshi Okano
Técnico Responsável

Notas:
1. Este certificado está de acordo com os termos do "Vocabulário Internacional de Metrologia" (VIM), em sua última revisão.
2. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer itens.
3. A reprodução total ou parcial deste certificado depende exclusivamente da aprovação por escrito da TECNOCALIBRAÇÃO.
4. Técnico Executante: Helio Hiroshi Okano.
5. Planta: Termo-Anemômetro REV.00.

Tecnocalibração - Calibração de instrumentos de medição
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - sala 01
Vila Anglo Brasileira - São Paulo, SP - CEP 05027-000
11 4861-4075 | comercial@tecnocalibração.com.br | www.tecnocalibração.com.br

TECNO CALIBRAÇÃO | **LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO** | **CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO** | **Nº 18970/20** | **PV Nº 0021042**

SOLICITANTE: Antonio Carlos Oscar Júnior
ENDEREÇO: RUA ANDRADE PERTENCE, 15 - CATETE - RIO DE JANEIRO - RJ

1. **Instrumento:** Termo-Anemômetro Digital
Fabricante: Incoterm
Modelo: TAN 050
Série: 15039637

TAG / Identificação: -10 a 45 °C
Faixa de Medição: 0 a 30 m/s
Resolução: 0,1 °C
0,01 m/s

2. **Método de Calibração:**
O instrumento foi calibrado pelo método comparativo com os padrões relacionados no item 5, os resultados foram obtidos através da média de três medições diretas no instrumento. Baseado em na Instrução de calibração: Termohigrômetro REV.00 e Anemômetro REV.00

3. **Temperatura durante a calibração:** 21 ± 3 °C

4. **Local da Calibração:** Tecnocalibração Serviços Ltda
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - Pompeia - São Paulo - SP - CEP: 05027-000

5. **Padrões Utilizados**
- Termohigrômetro Digital, nosso nº TEC-086, certificado LV-04662-08888-20-R0 de 19/3/2020 calibrado por Visomes (RBC nº 127), válido até 3/2022.
- Termo-Anemômetro Digital, nosso nº TEC-077, certificado 110896 de 27/12/2019 calibrado por Chrompack, válido até 11/2023.

6. **Resultados da Calibração:**

6.1. **Anemômetro**

Valor Indicado no Instrumento (m/s)	Valor Encontrado no Padrão (m/s)	Tendência (m/s)
0,0	0,00	0,00
4,0	3,93	0,07
8,0	7,91	0,09
12,0	11,87	0,13
16,0	15,87	0,13
20,0	19,86	0,14

6.2. **Temperatura**

Indicação (°C)	Encontrado (°C)	Tendência (°C)
10	10,1	-0,1
20	20,0	0,0
30	30,0	0,0
40	40,0	0,0
50	50,0	0,0

7. **Incerteza de Medição:**
Temperatura Interna: U = 0,3 °C
Anemômetro: 0,19 m/s

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k=2,00, o que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.

Data da Calibração: 11/12/2020
Data de Emissão: 11/12/2020

Helio Hiroshi Okano
Helio Hiroshi Okano
Técnico Responsável

Notas:
1. Este certificado está de acordo com os termos do "Vocabulário Internacional de Metrologia" (VIM), em sua última revisão.
2. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer itens.
3. A reprodução total ou parcial deste certificado depende exclusivamente da aprovação por escrito da TECNOCALIBRAÇÃO.
4. Técnico Executante: Helio Hiroshi Okano.
5. Planta: Termo-Anemômetro REV.00.

Tecnocalibração - Calibração de instrumentos de medição
Rua Doutor Miranda de Azevedo, 793 - sala 01
Vila Anglo Brasileira - São Paulo, SP - CEP 05027-000
11 4861-4075 | comercial@tecnocalibração.com.br | www.tecnocalibração.com.br