



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

AYOBAMI BADIRU MOREIRA

A VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL À ILHA DE CALOR URBANA NA CIDADE  
DE RECIFE – PE, BRASIL

Recife  
2021

AYOBAMI BADIRU MOREIRA

A VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL À ILHA DE CALOR URBANA NA CIDADE  
DE RECIFE – PE, BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutora em Geografia. Área de concentração: Regionalização e Análise Regional

Orientador: Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega

Recife  
2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Janeide Pereira da Silva, CRB4-1262

M838v Moreira, Ayobami Badiru.  
A vulnerabilidade socioespacial à ilha de calor urbana na Cidade de Recife – PE, BRASIL / Ayobami Badiru Moreira. – 2021.  
155 f. : il. ; 30 cm.

Orientador : Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.  
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2021.  
Inclui referências.

1. Geografia. 2. Climatologia urbana. 3. Ilha de calor urbana. 4. Índices.  
5. Vulnerabilidade. I. Nóbrega, Ranyére Silva (Orientador). II. Título.

910 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2022-107)

AYOBAMI BADIRU MOREIRA

**A VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL À ILHA DE CALOR URBANA NA  
CIDADE DE RECIFE - PE, BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em geografia. Área de concentração: regionalização e análise regional.

Aprovada em: 30/09/2021.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega (Orientador – Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Cristiana Coutinho Duarte (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Moura (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Profa. Dra. Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim (Examinadora Externa)  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. José Carlos Ugeda Júnior (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Mato Grosso

## AGRADECIMENTOS

Aos secretários, discentes e docentes do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco por todo o apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ranyére da Silva Nóbrega, por todo o suporte e contribuição na pesquisa.

À Profa. Dra. Cleusa Zamparoni pela sua amizade e presença, assim como pela oportunidade de participar do projeto “Desastres Naturais, Ilhas de Calor e Poluição do Ar em Recife-PE: Uma Contribuição às Questões Socioambientais do Planejamento Urbano”.

Ao Prof. Dr. Vincent Dubreuil por ter me recebido durante o doutorado sanduíche na Université Rennes 2 e por todo o ensinamento, essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa Tropoclima da UFPE pela disponibilidade da estrutura física do laboratório, pelos dados dos termohigrômetros e pelo companheirismo da equipe, em especial: Caio Américo de Almeida, Joyce Marinho, Líllian Anjos, Lucas Wanderley, Pedro Santos, Rafael Anjos, Tamires Mendes e Tânelly Neriah.

Aos voluntários que permitiram a instalação dos termohigrômetros e receberam o nosso grupo em suas propriedades: Alicia Lira, Felipe Batista, Isabel Suassuna, Maria da Salete de A. Wanderley e Wellen Aquino.

À equipe do laboratório LETG-Rennes/COSTEL da Université Rennes 2 e às pessoas que tive a oportunidade de conhecer durante o doutorado sanduíche, em especial: Ana Lages, Damien Arvor, Geisa Rocha, Guilherme Pessoa, Pedro Mutti e Raquel Costa.

Aos meus pais Silvana Badiru e Ajíbola Badiru e a todos os meus familiares pelos ensinamentos e suporte que me acompanharam durante a minha vida e contribuíram para o sucesso desta pesquisa.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo da vida acadêmica e pessoal, em especial a: Ana Raquel Ramos, Danielson Neves, Edlaine Martins, Paloma Regala e Reillen Martins.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo suporte e pelas bolsas concedidas, fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

À quem contribuiu direta ou indiretamente nessa pesquisa, muito obrigada!

“E eis a levar o seu caminho  
Cambaleando pelos trilhos  
Se embriagando pelos rios  
Bisbilhotado pelos vizinhos...

Dizem ele ser um megalomaníaco  
Tudo o que apresenta é um delírio:  
O maior dos maiores ricos  
Do maior dentre os maiores reinos  
Fundado pelo maior deles  
Daqueles que pelo maior navio  
Pelo maior mar veio.

Dizem também ser ele um louco  
Diagnosticado por manias únicas:  
De sob o sol, se banhar na lama.  
No carnaval, urinar na rua.  
Na chuva, rasgar dinheiro no asfalto.  
Frevar até encâimbrar os músculos  
Cantar contos vulgares, de atentar os beatos.

Eles dizem! Dizem mesmo muito mais!  
Contar aparência, difícil não é!

Não percebem que dentre a loucura e a grandeza  
Dentre a lama e a insolência  
Abriga um ser marcado em seu caminho.

[...]

Não sabem que guarda em si um tesouro,  
Ofertado pelos seus ancestrais  
Decifrar seu mapa é para poucos,  
Para menos ainda os seus sinais. ” (MOREIRA, 2017)

## RESUMO

O presente estudo teve o objetivo de avaliar o grau de vulnerabilidade socioespacial da cidade do Recife à intensidade da Ilha de Calor Urbana (ICU). Partindo da hipótese de que o impacto da ICU nesta cidade envolve tanto os fatores físicos quanto sociais da paisagem urbana. Para isto, a paisagem urbana foi mapeada de acordo a cobertura e estrutura da superfície por meio da classificação não-supervisionada de imagem de satélite e da sobreposição do Modelo Digital do Terreno (MDT) e do Modelo Digital de Superfície (MDS). Foram obtidos dados atmosféricos registrados em oito pontos de observação, os quais foram analisados nas escalas temporais horária, diária, mensal e sazonal. A partir dos dados atmosféricos e de superfície, a espacialização da ICU foi realizada pela modelagem espacial multivariada. A análise da vulnerabilidade socioespacial à ICU considerou as seguintes componentes: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação. A primeira foi resultante no mapeamento da ICU e as demais baseadas em dados do censo demográfico, resultando o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS). A Análise Fatorial (AF) por meio de Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada no processamento os dados demográficos. As três componentes foram sintetizadas no Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à ICU (IVSI). Foram identificadas três áreas principais de elevada intensidade de ICU em Recife. Apesar da ICU ser principalmente noturna, ela também foi identificada nos horários vespertinos. A ICU se desenvolveu mais rapidamente no período chuvoso, apresentando núcleos bem definidos de ICU “muito forte” logo após o pôr-do-sol. No período seco, estes núcleos só se destacaram a partir da meia noite e o horário de maior intensidade da ICU na cidade é durante a madrugada (próximo às 2 horas da manhã). As áreas de maior exposição à ICU se apresentaram na região central e nos bairros próximos à linha de costa. Apesar disto, a maioria destes bairros apresentaram pouca vulnerabilidade à ICU devido à elevada capacidade de adaptação de seus residentes. Esta análise constatou que há bairros em Recife que mesmo sob baixa intensidade de ICU apresentam elevada vulnerabilidade ao seu impacto, pois se encontram sob elevada vulnerabilidade social. Para estes bairros, as medidas de mitigação devem ser voltadas aos fatores sociais e à redução da insalubridade no interior e no entorno dos domicílios. Enquanto isto, os bairros centrais precisam investir em alternativas que amenizem diretamente a formação da ICU. O presente estudo encoraja as pesquisas futuras a procurarem formas de refinar a

modelagem espacial da ICU a partir da obtenção de uma rede maior de pontos de coletas de dados climáticos. Estudos futuros também podem fazer uso dos resultados obtidos na análise de vulnerabilidade, e assim, avançar na construção de estratégias de mitigação/adaptação ao impacto da ICU sobre as cidades.

**Palavras-chave:** climatologia urbana; ilha de calor urbana; vulnerabilidade; índices, Recife.

## ABSTRACT

This study aimed to assess the degree of Sociospatial vulnerability of the city of Recife - PE (Brazil) to the Urban Heat Island (UHI) intensity. It assumes that the UHI impact in this city involves both physical and social factors of the urban landscape. The urban landscape was mapped according to the surface coverage and structure. For this, unsupervised classification of satellite image and the overlay between the Digital Terrain Model (DTM) and the Digital Surface Model (MDS) were used. Atmospheric data recorded at eight observation points were obtained, which were analyzed in hourly, daily, monthly, and seasonal time scales. From the atmospheric and surface data, the UHI spatialization was performed by multivariate spatial modeling. The UHI Sociospatial vulnerability analysis considered the following components: exposure, sensitivity, and adaptive capacity. The first component used the UHI mapping, and the others were based on demographic census data, resulting in the Social Vulnerability Index (IVS). Factor Analysis (FA) through Principal Component Analysis (PCA) was used to process the demographic data. The three components were synthesized in the UHI Sociospatial Vulnerability Index (USVI). Three main areas of UHI high intensity were identified in Recife. Although UHI is mainly nocturnal, it has also been identified in the afternoon hours. UHI developed more rapidly in the rainy season, with well-defined areas of “very strong” UHI intensities just after sunset. In the dry period, these areas only stood out from midnight onwards. The period of greatest UHI intensity in the city is late in the night (close to 2:00 am). The most exposed areas to UHI were found in the central region and in districts close to the coastline. Despite this, most of these areas showed little UHI vulnerability due to the high adaptive capacity of their residents. This analysis found that there are districts in Recife that, even under low UHI intensity, are highly vulnerable to its impact, as they are under high social vulnerability. For these districts, mitigation measures should be focused on social factors and reducing unhealthy conditions in and around the households. Meanwhile, districts in and near the city core need to invest in alternatives that directly mitigate UHI formation. The present study encourages future research to find ways to refine the UHI spatial modeling through obtaining a larger network of climate data points. Future studies can also make use of the results presented in this study, thus, advance in the construction of mitigation/adaptation strategies for the UHI impact on cities.

**Keywords:** urban climatology; urban heat island; vulnerability; indexes, Recife.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Ilustração das diferenças de temperatura formadoras dos quatro tipos de ICU: a ilha de calor de superfície, a ilha de calor da atmosfera inferior, a ilha de calor da atmosfera superior e a ilha de calor subsuperficial.   | 31 |
| Figura 2 – Representação esférica e bidimensional da abóbada celeste (h), o seu ponto central (C) e os obstáculos visuais (“obs”).  | 33 |
| Figura 3 – Descrição esquemática de ICUatm ao longo da malha urbana (à esquerda) e seu comportamento diurno e noturno em um transecto que atravessa o entorno rural, a malha urbana, um parque urbano e o centro da cidade (à direita).   | 35 |
| Figura 4 – As esferas do conceito de vulnerabilidade.   | 41 |
| Figura 5 – Representação de um modelo de vulnerabilidade do lugar.  | 42 |
| Figura 6 – A vulnerabilidade e as suas três componentes: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação.  | 43 |
| Figura 7 – Distribuição espacial da mortalidade (esquerda) e intensidade da ICU (direita) durante a onda de calor de 2003 na cidade de Madrid.  | 44 |
| Figura 8 – Planta da cidade do Recife em 1906.  | 48 |
| Figura 9 – Planta da cidade do Recife em 1951.  | 49 |
| Figura 10 – Três representações da orla de Boa Viagem: uma ilustração de um mocambo da vila dos pescadores e plantações de coqueiro no plano de fundo (a); a Av. Boa Viagem recém finalizada e algumas residências de veraneio (b) e; a atual paisagem urbana resultante do processo de verticalização (c). | 50 |
| Figura 11 – À esquerda: Mapa de expansão urbana do Recife. À direita: Localização dos bairros submetidos à “Lei dos Doze Bairros”.  | 51 |
| Figura 12 – Mapa do Zoneamento do Recife pela Lei 17.511 de 2008.   | 51 |
| Figura 13 – Média anual da precipitação entre os anos de 2015 e 2018.   | 53 |
| Figura 14 – À esquerda: fluxo de calor sensível nos anos de 1998, 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011. À direita: saldo de radiação na superfície nos anos de 1987, 1990, 1991, 2005, 2006, 2007, 2010 e 2011 no Recife.  | 55 |
| Figura 15 – Mapa do zoneamento de oito microclimas de Recife (à esquerda) e microzonas nos bairros de Boa Vista e Soledade (à direita).   | 56 |
| Figura 16 – Mapa de localização da área cidade do Recife.   | 59 |
| Figura 17 – Mapa do Recife apresentando os limites das Regiões Político–Administrativas (RPA) e seus respectivos bairros numerados e listados.  | 61 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 18 – Representação do entorno da Estação de Referência Rural (Eref).  | 65  |
| Figura 19 – Localização dos sensores, detalhes da instalação dos termohigrômetros e tabela de disponibilidade dos dados, marcando em vermelho os meses sem nenhum registro de dados, em laranja os meses com até 15 dias de falta de dados, em verde os meses com até 3 dias de falta de dados e em azul os meses sem nenhum dia faltante.       | 66  |
| Figura 20 – Representação do entorno do Termohigrômetro 01 (TH01), à esquerda e do Termohigrômetro 02 (TH02) à direita.  | 66  |
| Figura 21 – Representação do entorno do Termohigrômetro 03 (TH03), à esquerda e do Termohigrômetro 04 (TH04) à direita.  | 67  |
| Figura 22 – Representação do entorno do Termohigrômetro 05 (TH05), à esquerda e do Termohigrômetro 06 (TH06) à direita.  | 68  |
| Figura 23 – Representação do entorno do Termohigrômetro 07 (TH07).   | 68  |
| Figura 24 – Ilustração da diferença entre os intervalos de dia oficial (em azul) e de estudo (em laranja).   | 69  |
| Figura 25 – Principais etapas do desenvolvimento do IVSI.  | 74  |
| Figura 26 – Espacialização da ICU ao longo da área de estudo estimada pelo modelo no dia 12 de junho de 2018 em 8 horários (09, 12, 15, 18, 21, 00, 03 e 05 horas).  | 114 |
| Figura 27 – Intensidade máxima de ICU nos bairros de Recife no período chuvoso.  | 115 |
| Figura 28 – Espacialização da ICU ao longo da área de estudo estimada pelo modelo no dia 27 de dezembro de 2018 em 8 horários (09, 12, 15, 18, 21, 00, 03 e 05 horas).   | 118 |
| Figura 29 – Intensidade máxima de ICU nos bairros de Recife no período seco. Fonte: Autoria própria  | 119 |
| Figura 30 – – Classes de cobertura do solo do Recife.  | 121 |
| Figura 31 – Classes de cobertura do solo do Recife.  | 124 |
| Figura 32 – Bairros da RPA 01, localização do TH04, porcentagens de Cobertura Vegetal (CV), Cobertura Hídrica (CH), Superfície Edificada (SE) e respectivas subclasses.  | 125 |
| Figura 33 – A Área B: Espacialização e porcentagem das classes de cobertura/estrutura da paisagem, núcleos de ICU e localização do TH03 e TH06.  | 126 |
| Figura 34 – À esquerda: Elementos de paisagem mapeados, identificação dos bairros e locais de destaque: Avenida Marechal Mascarenhas de Moraes (A), Pista do Aeroporto Internacional dos Guararapes (B) e Parque dos Manguezais (C). À direita: Fator de Visão do Céu (FVC) nos bairros da orla marítima e adjacências na cidade de Recife – PE. | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 35 – Gráficos de rosa dos ventos para o período chuvoso (esquerda) e período seco (direita) na cidade do Recife.  | 129 |
| Figura 36 – Distribuição espacial dos fatores de IVS por setor censitário, classificados por quantis.  | 134 |
| Figura 37 – Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) mapeado por setores censitários na cidade do Recife – PE, com destaque para os bairros da classe de IVS “Muito Alta”. | 136 |
| Figura 38 – Índice de Vulnerabilidade Físico–Ambiental à ICU (IVFAI) mapeado por setores censitários na cidade do Recife – PE  | 137 |
| Figura 39 – Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à ICU (IVSI) mapeado por setores censitários na cidade do Recife – PE.   | 139 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Gráfico 1 –  | Função densidade de probabilidade de temperatura máxima (contínuo) e mínima (pontilhada) das décadas: Azul – 1961 a 1991; Verde – 1976 a 2006; Vermelho – 1991 a 2019 na cidade do Recife.   | 47 |
| Gráfico 2 –  | Médias mensais de precipitação acumulada entre 1981 e 2010 (barras azuis); os meses do período chuvoso (barras em azul escuro) e do período seco (barras em azul claro); médias mensais de Ta para o ano de 2018 (linha contínua) e curva de Ta referente à normal climatológica | 68 |
| Gráfico 3 –  | Médias mensais de Ta (linha vermelha contínua), de Ur (linha contínua em azul) para o ano de 2018 e normal climatológica de Ta (linha tracejada em laranja) e de Ur (linha tracejada em azul).   | 70 |
| Gráfico 4 –  | Médias mensais horárias da Ta registrada pela Estação de Referência Rural (Eref) durante o ano de 2018.  | 71 |
| Gráfico 5 –  | Médias mensais de Ta em ponto de coleta de dados.  | 71 |
| Gráfico 6 –  | Variabilidade média mensal da ICU no TH01 no ano de 2018.  | 73 |
| Gráfico 7 –  | Variabilidade e horária da ICU no TH01 para o período seco do ano de 2018.   | 74 |
| Gráfico 8 –  | Variabilidade e horária da ICU no TH01 para o período chuvoso do ano de 2018.  | 74 |
| Gráfico 9 –  | Intensidade relativa média diária da ICU no TH01 durante o ano de 2018.  | 75 |
| Gráfico 10 – | Variabilidade mensal da ICU no TH02 no ano de 2018.  | 76 |
| Gráfico 11 – | Variabilidade e horária da ICU no TH02 para o período seco do ano de 2018.   | 77 |
| Gráfico 12 – | Variabilidade e horária da ICU no TH02 para o período chuvoso do ano de 2018.  | 77 |
| Gráfico 13 – | Intensidade média diária da ICU no TH02 durante o ano de 2018. Fonte: Autoria própria.   | 79 |
| Gráfico 14 – | Variabilidade mensal da ICU no TH03 no ano de 2018.  | 80 |
| Gráfico 15 – | Variabilidade e horária da ICU no TH03 para o período seco e o período chuvoso do ano de 2018.   | 81 |
| Gráfico 16 – | Variabilidade e horária da ICU no TH03 para o período seco e o período chuvoso do ano de 2018.   | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| Gráfico 17 – Intensidade média diária da ICU no TH03 durante o ano de 2018.                                 | 82  |
| Gráfico 18 – Variabilidade mensal da ICU no TH04 no ano de 2018.  | 84  |
| Gráfico 19 – Variabilidade e horária da ICU no TH04 para o período chuvoso do ano de 2018.                  | 85  |
| Gráfico 20 – Variabilidade e horária da ICU no TH04 para o período seco do ano de 2018.                     | 85  |
| Gráfico 21 – Intensidade média diária da ICU no TH04 durante o ano de 2018.                                 | 86  |
| Gráfico 22 – Variabilidade mensal da ICU no TH05 no ano de 2018.  | 87  |
| Gráfico 23 – Variabilidade e horária da ICU no TH05 para o período chuvoso do ano de 2018.                  | 88  |
| Gráfico 24 – Variabilidade e horária da ICU no TH05 para o período chuvoso do ano de 2018.                  | 88  |
| Gráfico 25 – Intensidade média diária da ICU no TH05 durante o ano de 2018.                                 | 90  |
| Gráfico 26 – Variabilidade mensal da ICU no TH06 no ano de 2018.  | 90  |
| Gráfico 27 – Variabilidade e horária da ICU no TH06 para o período chuvoso do ano de 2018.                  | 91  |
| Gráfico 28 – Variabilidade e horária da ICU no TH06 para o período seco do ano de 2018.                     | 92  |
| Gráfico 29 – Intensidade média diária da ICU no TH06 durante o ano de 2018.                                 | 93  |
| Gráfico 30 – Variabilidade mensal da ICU no TH07 no ano de 2018.  | 94  |
| Gráfico 31 – Variabilidade e horária da ICU no TH07 para o período chuvoso do ano de 2018.                  | 95  |
| Gráfico 32 – Variabilidade e horária da ICU no TH07 para o período seco do ano de 2018.                     | 95  |
| Gráfico 33 – Intensidade média diária da ICU no TH07 durante o ano de 2018. Autoria própria.                | 97  |
| Gráfico 34 – Acumulado diário de precipitação no mês de junho de 2018 em Recife.                            | 100 |
| Gráfico 35 – Valores horários de ICU em cada TH durante o dia 12 de junho de 2018.                          | 101 |
| Gráfico 36 – Acumulado diário de precipitação no mês de dezembro de 2018 em Recife. Fonte: INMET.           | 104 |
| Gráfico 37 – Valores horários de ICU em cada TH durante o dia representativo seco (27 de dezembro de 2018). | 105 |

Gráfico 38 – Diagramas boxplot dos valores de ICU horária nos pontos observados e representação dos intervalos de intensidade relativa de ICU pelo seguinte gradiente: azul escuro (extremamente fraca), azul (muito fraca), azul claro (fraca), verde (habitual), amarelo (forte), laranja (muito forte) e vermelho (extremamente forte).

## LISTA DE QUADROS

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Quadro 1 –  | Abordagens para o estudo do efeito do clima urbano ao longo das décadas                           | 29  |
| Quadro 2 –  | Lista das causas potenciais da ICUatm   | 34  |
| Quadro 3 –  | Classificação de magnitude da ICU   | 35  |
| Quadro 4 –  | Os pontos chaves das pesquisas de ICU nas cidades tropicais                                       | 38  |
| Quadro 5 –  | Classes e subclasses de cobertura do solo e respectivos critérios de delimitação                  | 63  |
| Quadro 6 –  | Classificação de magnitude da ICU   | 70  |
| Quadro 7–   | Intervalos dos quantis e classes de intensidade de ICU  | 71  |
| Quadro 8 –  | Variáveis independentes do modelo   | 72  |
| Quadro 9 –  | Lista das variáveis demográficas iniciais consideradas no Grupo 1 (criticidade)                   | 75  |
| Quadro 10 – | Lista das variáveis demográficas iniciais consideradas no Grupo 2 (capacidade de suporte)         | 75  |
| Quadro 11 – | Relação dos fatores e das variáveis demográficas selecionadas pela AF com suas respectivas cargas | 132 |

## LISTA DE TABELAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabela 1 –  | Janelas móveis utilizadas e respectivos raios de abrangência.   | 62 |
| Tabela 2 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade relativa de ICU para o TH01, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período. | 75 |
| Tabela 3 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH02, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.          | 78 |
| Tabela 4 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH03, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.          | 82 |
| Tabela 5 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH04, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.          | 86 |
| Tabela 6 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH05, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.          | 89 |
| Tabela 7 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH06, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.          | 93 |
| Tabela 8 –  | Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH07, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.          | 96 |
| Tabela 9 –  | Correlações globais das simulações para os dias representativos.  | 98 |
| Tabela 10 – | Correlações estatísticas entre a intensidade da ICU e as classes de entrada do modelo para o dia representativo do período chuvoso.   | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 11 – Correlações estatísticas entre a intensidade da ICU e as classes de entrada do modelo para o dia representativo do período seco. | 99  |
| Tabela 12 – Porcentagens das classes de cobertura/estrutura da paisagem no perímetro urbano de Recife.                                       | 108 |
| Tabela 13 – Características gerais das ICU registradas pelos TH.   | 110 |
| Tabela 14 – Lista dos bairros com maiores valores médios de ICU <sub>máx</sub> .   | 112 |
| Tabela 15 – Variância total explicada dos fatores calculados para o IVS.   | 121 |
| Tabela 16 – Lista dos bairros correspondentes à classe de IVSI muito alta e respectivos scores de exposição, IVS e seus fatores.             | 126 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| AA     | Análise de Agrupamento   |
| ACP    | Análise de Componentes Principais                              |
| AF     | Análise Fatorial   |
| APAC   | Agência Pernambucana de Águas e Clima                          |
| CH     | Corpo Hídrico  |
| CTU    | Campo Térmico Urbano   |
| CV     | Cobertura Vegetal  |
| F      | Fator  |
| FP     | Fator Principal  |
| FVC    | Fator de Visão do Céu  |
| G      | Banda espectral do verde                                       |
| IADN   | Índice de Áreas Construídas por Diferença Normalizada          |
| IBGE2  | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                |
| ICU    | Ilha de Calor Urbana   |
| ICUatm | Ilha de Calor Urbana atmosférica                               |
| ICUmáx | Ilha de Calor Urbana máxima                                    |
| ICUsub | Ilha de Calor Urbana subsuperficial                            |
| ICUsup | Ilha de Calor Urbana superficial                               |
| ICUubl | Ilha de Calor Urbana da camada limite                          |
| IMDNA  | Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água             |
| INMET  | Instituto Nacional de Meteorologia                             |
| IPCC   | Intergovernmental Panel on Climate Change                      |
| ITU    | Índice de Temperatura e Umidade                                |
| IVDN   | Índice de Vegetação por Diferença Normalizada                  |
| IVSI   | Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à Ilha de Calor Urbana |
| MDS    | Modelo Digital de Superfície                                   |
| MDT    | Modelo Digital do Terreno                                      |
| MIR    | Banda espectral do infravermelho médio                         |
| NEB    | Região Nordeste do Brasil                                      |
| NIR    | Banda espectral do infravermelho próximo                       |
| OMS    | Organização Mundial de Saúde                                   |
| PE3D   | Projeto Pernambuco Tridimensional                              |

|            |  |
|------------|--|
| RPA        | Região Político–Administrativa                               |
| SCU        | Sistema Clima Urbano   |
| SE         | Superfície Edificada   |
| SEBAL      | Surface Energy Budget Algorithm for Land                     |
| SIG        | Sistema de Informação Geográfica                             |
| TH         | Termohigrômetro  |
| TH01       | Termohigrômetro 01   |
| TH02       | Termohigrômetro 02   |
| TH03       | Termohigrômetro 03   |
| TH04       | Termohigrômetro 04   |
| TH05       | Termohigrômetro 05   |
| TH06       | Termohigrômetro 06   |
| TH07       | Termohigrômetro 07   |
| Tropoclima | Grupo de Estudos em Climatologia Tropical e Eventos Extremos |
| UTC        | Coordinated Universal Time                                   |
| V          | Banda espectral do vermelho                                  |
| ZAC        | Zona de Ambiente Construído                                  |
| ZAN        | Zona de Ambiente Natural                                     |
| ZEIS       | Zona Especial de Interesse social                            |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|        |  |
|--------|--|
| Eref   | Estação de Referência Rural                      |
| p      | limite quantílico                                |
| p      | peso da variável                                 |
| q      | carga fatorial                                   |
| Qp     | Quantil  |
| Ta_ref | Temperatura do ar na Estação de Referência Rural |
| Ta_th  | Temperatura do ar no termohigrômetro             |
| Tamáx  | Temperatura do ar máxima                         |
| Tamín  | Temperatura do ar mínima                         |
| Ur     | Umidade Relativa                                 |

## SUMÁRIO

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>24</b>  |
| 1.1          | OBJETIVOS   | 26         |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | <b>27</b>  |
| 2.1          | O CLIMA URBANO NO ÂMBITO DOS ESTUDOS DE ILHA DE CALOR URBANA E SUAS PERSPECTIVAS E DESAFIOS NAS CIDADES TROPICAIS | 27         |
| 2.2          | OS CONCEITOS DE VULNERABILIDADE E O SEU CONTEXTO NOS ESTUDOS DE ICU   | 40         |
| 2.3          | OS ESTUDOS DE CLIMA URBANO NA CIDADE DO RECIFE E SEUS DESAFIOS  | 47         |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>  | <b>59</b>  |
| 3.1          | ÁREA DE ESTUDO  | 59         |
| 3.2.         | PROCEDIMENTO METODOLÓGICO   | 62         |
| <b>3.2.1</b> | <b>Caracterização física do Espaço Urbano e suas condicionantes geoambientais</b>                                 | <b>62</b>  |
| <b>3.2.2</b> | <b>Obtenção dos dados climáticos</b>  | <b>64</b>  |
| <b>3.2.3</b> | <b>Análise dos dados climáticos e o cálculo da ICU</b>  | <b>68</b>  |
| <b>3.2.4</b> | <b>Modelagem espacial da ICU</b>  | <b>71</b>  |
| <b>3.2.5</b> | <b>Análises de vulnerabilidade socioespacial à ICU</b>  | <b>73</b>  |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>  | <b>77</b>  |
| 4.1          | RESULTANTES DOS DADOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS   | 77         |
| <b>4.1.1</b> | <b>Características gerais da <math>E_{ref}</math> e dos TH no período de estudo</b>                               | <b>77</b>  |
| <b>4.1.2</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH01</b>   | <b>81</b>  |
| <b>4.1.3</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH02</b>   | <b>84</b>  |
| <b>4.1.4</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH03</b>   | <b>88</b>  |
| <b>4.1.5</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH04</b>   | <b>92</b>  |
| <b>4.1.6</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH05</b>   | <b>96</b>  |
| <b>4.1.7</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH06</b>   | <b>100</b> |
| <b>4.1.8</b> | <b>Dados resultantes de ICU no TH07</b>   | <b>104</b> |
| 4.2          | RESULTANTES DA DIMENSÃO ESPACIAL DA ICU NOS DIAS REPRESENTATIVOS  | 108        |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| <b>4.2.1</b> | <b>Análise espacial da ICU no dia representativo do período chuvoso</b> | <b>110</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Análise espacial da ICU no dia representativo do período seco</b>    | <b>115</b> |
| 4.3          | DISCUSSÃO ACERCA DA PAISAGEM URBANA E A ICU RESULTANTE EM RECIFE        | 119        |
| 4.4          | A VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL À ICU NA CIDADE DO RECIFE               | 132        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>                                       | <b>144</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>146</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A consolidação do clima urbano como campo de estudo é resultante das transformações relativas à formação e à expansão das cidades, intensificadas a partir do século XX. Neste contexto os estudos de clima urbano desempenharam um papel essencial na investigação dos processos físicos atmosféricos que interagem com o espaço urbano em diversas escalas.

O desenvolvimento destes estudos pode ser compreendido a partir de dois períodos principais: o período clássico (do séc. XIX até a década de 1980) e o período moderno (período atual) (STEWART, 2019). O período clássico ocorreu principalmente nos países europeus e anunciou os primeiros métodos, conceitos e fenômenos do clima urbano. Dentre eles, os relativos à Ilha de Calor Urbana (ICU), de modo que já no final da década de 1960 os fatores gerais causadores da ICU já eram amplamente discutidos.

A principal característica da fase moderna está no desenvolvimento de novas técnicas de análise, incluindo modelos mais realísticos de clima urbano; e na disseminação dos estudos em diversos portes de cidades, indo além da realidade dos países desenvolvidos. Isto possibilitou uma nova percepção acerca da superfície urbana e do seu contraste com o meio rural.

As possibilidades de análise passam a deixar de corresponder à dicotomia “rural x urbano” e as diversidades da paisagem urbana são cada vez mais discutidas pelo confronto das particularidades locais em relação às definições gerais estabelecidas no período clássico. Além disto, ao mesmo tempo em que se procura ampliar a compreensão das particularidades locais sobre o clima urbano, também surge o desafio de ajustar-se a uma representação que possibilite relacionar características de cidades distintas e ampliar a escala das discussões.

Neste processo de conciliar a discussão para diversas escalas, ainda há a necessidade de ir além dos limiares do universo acadêmico no sentido de aproximar-se ao planejamento urbano e ambiental. Este desafio é ainda maior do que o primeiro, pois depende de um tipo de colaboração que envolve diversos sujeitos/interesses. Isto contribui para o clima urbano ainda ser negligenciado no planejamento das cidades brasileiras, apesar de interferir diretamente na qualidade de vida da população, como Gomes (2008) expõe:

“Contudo, apesar da evidente relação entre os efeitos climáticos e o crescimento urbano, poucos desdobramentos práticos são estabelecidos entre esses dois campos temáticos na busca por uma maior sustentabilidade urbana, especialmente no caso brasileiro, onde a complexidade do próprio processo de urbanização é somada às condições climáticas de tropicalidade.” (GOMES, P. S., 2008).

No caso da cidade do Recife, foi exposto que a relação entre a cidade e o clima é marcada por conflitos (Cap. 2.3). Do ponto de vista termodinâmico, a temperatura do ar desta cidade reflete as transformações da superfície decorrentes do processo (intensivo e extensivo) de crescimento urbano e tem se apresentado com a tendência geral de acréscimo ao longo dos últimos anos. Porém, ao considerar a variabilidade espacial da temperatura do ar ao longo da malha urbana, a quantidade de pontos públicos de coleta de dados ainda é insuficiente.

O estresse térmico urbano é imediatamente associado à sensação de desconforto térmico, porém suas consequências abrangem um espectro maior de possibilidades, por exemplo: o acréscimo do consumo de energia; dificuldades e danos sobre os sistemas respiratório e nervoso; maior concentração de poluentes no canyon urbano; maior propagação de epidemias e maior risco de óbitos de crianças, idosos e pessoas sob condições médicas especiais.

A variedade dos danos (tanto diretos quanto indiretos) afeta a população em diversas magnitudes, mas nem sempre são tão evidentes. Os estudos de clima urbano realizados na cidade do Recife voltados às variáveis termodinâmicas avançaram na compreensão da análise de tendências climáticas, no comportamento diurno das componentes do saldo de radiação na superfície, em análises pontuais de conforto de ICU e, mais recentemente, na relação entre as variáveis termodinâmicas e a disseminação de doenças.

A partir destes avanços, segue o desafio de aprofundar a compreensão da natureza destas variáveis e de como elas interagem com a população. Para isto, é preciso ir além da análise pontual dos dados e tentar decifrar a cidade em sua complexidade. A análise da ICU é fundamental neste processo pois ela é o principal fenômeno do Campo Térmico Urbano.

Desta forma, as seguintes questões são levantadas: “o que favorece a formação da ICU na cidade do Recife?”, “como ocorrem as variabilidades temporal e espacial da ICU ao longo da sua malha urbana?”, “Como a ICU impacta a população

desta cidade?”. Estas questões surgem a partir da hipótese de que o impacto da ICU envolve **fatores sociais** e **físicos** da paisagem urbana.

As medidas de mitigação da ICU comumente apresentadas pela literatura são voltadas às intervenções em propriedades físicas da paisagem urbana, fundamentalmente baseadas na redução da temperatura do ar através do aumento do albedo ou da evapotranspiração. Responder tais questões permite identificar quais destas medidas são mais eficientes para as particularidades do campo térmico nesta cidade. Também cria uma base para a formação de estratégias de mitigação que atravesse os fatores sociais, pois a ICU é um fenômeno que impacta de maneiras diferentes populações que apresentam características distintas.

A avaliação da vulnerabilidade socioespacial à ICU constrói um panorama das questões a serem enfrentadas na escala local e no momento atual, sem competir com as demais análises, mas acrescentando uma nova abordagem com potencial integrativo e complementar. Integrativo, pois une as dimensões social e físico-ambiental na mesma abordagem; complementar, pois a ICU não é um fenômeno isolado.

## 1.1 OBJETIVOS

Partindo da hipótese de que o impacto da ICU na cidade do Recife envolve fatores sociais e físicos da paisagem urbana, o presente estudo tem o objetivo geral de avaliar o grau de vulnerabilidade desta cidade ao fenômeno da ICU por meio do desenvolvimento do Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à ICU. Para isto, são listados os seguintes objetivos específicos:

- a) Investigar a composição da cobertura e da estrutura da paisagem urbana da área de estudo;
- b) Analisar a variabilidade espacial e temporal da temperatura do ar e da ICU de acordo com diferentes composições de paisagem.
- c) Explicar os fatores sociais e ambientais que interagem com a intensidade da ICU na cidade do Recife.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“O clima urbano (...) é o clima submetido ao desenvolvimento urbano” (OKE, 2006).

As transformações econômicas, sociais e tecnológicas que marcaram o Século XX resultaram na expansão, muitas vezes desordenada, das cidades. Este fenômeno ocorreu mundialmente e, com isto, os problemas associados. Como a expansão urbana é um fenômeno irreversível, a necessidade de compreendê-la se tornou, mais do que inevitável, um desafio para a sobrevivência e manutenção deste ambiente.

A climatologia desempenhou um papel indispensável na investigação dos processos físicos atmosféricos que interagem com o espaço urbano em diversas escalas, e com isto, o clima urbano se consolidou como um novo campo de estudo. A trajetória dos estudos está documentada na literatura internacional e nacional (ARNFIELD, 2003; BROWN et al. 2018; JAUREGUI, 1991; FIALHO, 2009; KOTHARKAR et al., 2018; AMORIM, 2019; MILLS, 2014; STEWART, 2019; ZANELLA & MOURA, 2013; ANDRADE, 2012).

Neste contexto de expansão urbana, concentração demográfica e impacto ambiental, o conceito de vulnerabilidade também passou a ser objeto de estudos geográficos e a se desenvolver como termo científico. Os capítulos seguintes expõem os conceitos-chave e a trajetória das pesquisas de clima urbano e ICU (Cap. 2.1), os principais conceitos de vulnerabilidade e como ela trata a ICU (Cap. 2.3) e, por fim, um panorama do desenvolvimento e desafios dos estudos de clima urbano na cidade do Recife (Cap. 2.3).

### 2.1 O CLIMA URBANO NO ÂMBITO DOS ESTUDOS DE ILHA DE CALOR URBANA E SUAS PERSPECTIVAS E DESAFIOS NAS CIDADES TROPICAIS

Lowry, (1977) define a natureza do **clima urbano** pela Equação 1, onde  $M$  representa uma dada variável climática em um dado local urbano ( $i$ ), momento ( $t$ ) e tipo de tempo ( $x$ );  $C$ ,  $L$  e  $U$  representam respectivamente as componentes regional, local e urbana. Desta forma, “o Clima Urbano resulta da interação dos fatores urbanos com o clima regional e com o meio físico pré-existente” (ANDRADE, 2005).

$$M_{i,t,x} = C_{i,t,x} + L_{i,t,x} + U_{i,t,x} \quad \text{Equação 1}$$

Oke (2006) explica que o termo clima urbano é utilizado convenientemente como uma contração da frase “meteorologia e climatologia urbanas”, pois inclui o estudo dos processos meteorológicos, fenômenos atmosféricos e a combinação dos mesmos expressos a longo prazo como o clima submetido ao desenvolvimento urbano.

Do ponto de vista da percepção humana, Monteiro (1976) elaborou o conceito teórico-metodológico do Sistema Clima Urbano (SCU) baseado em três canais de percepção, nomeados: Conforto Térmico, Qualidade do Ar e Impacto Meteórico. O primeiro relacionado às variáveis termodinâmicas e apontado por Monteiro (1976) como “o insumo básico do SCU”, atravessando toda a estrutura desse sistema. O segundo é relativo aos aspectos físico-químicos e à condição de salubridade do ar. O terceiro é relativo aos fenômenos hidrometeorológicos, como as tempestades.

O conceito de **campo térmico** converge com o canal termodinâmico (nomeado Conforto Térmico), a própria **temperatura** é associada ao sentido humano, pois ela é a percepção do calor. Rocha (2009) afirma que “a ideia de **campo** pode motivar um rico debate”, este termo é uma noção da física e pode ser compreendido tanto do ponto de vista da interação entre os corpos em uma determinada distância quanto como uma função matemática para descrever propriedades físicas da matéria nos casos em que a mesma é tratada como contínua. No caso do **Campo Térmico Urbano** (CTU), a propriedade física da matéria é a temperatura intrínseca ao espaço urbano.

O desenvolvimento histórico das pesquisas que envolvem o clima urbano ocorreu a partir da identificação da influência da cobertura do solo sobre o comportamento da temperatura do ar. No final do século XVIII já se evidenciava a preocupação sobre esta influência (CERVENY, 2009) e em meados do século XIX as pesquisas sistemáticas começaram a ser implementadas (Luke Howard em Londres, Noah Webster em Nova York, etc.). O interesse científico sobre a existência da ICU foi motivado principalmente pela necessidade de discutir a sua relação com o conforto térmico e com o consumo de energia.

Mackillop (2011) apresenta um breve histórico da climatologia urbana e seus principais autores internacionais enquanto Mills (2014) apresenta uma linha do tempo acerca das diferentes abordagens das pesquisas sobre o efeito do clima urbano ao longo das décadas (Quadro 1). Estes dois autores enfatizam em comum a transformação do carácter descritivo desta disciplina para o carácter exploratório.

Quadro 1 – Abordagens para o estudo do efeito do clima urbano ao longo das décadas.

| <b>Período</b> | <b>Abordagem</b>   |
|----------------|--|
| 1900           | Observação e descrição dos efeitos urbanos usando equipamentos meteorológicos convencionais (termômetros, higrômetros etc.)  |
| 1960           | Direcionamento para medir variáveis de “processos” – radiação, trocas de calor sensível e latente. Uso de métodos estatísticos para resumir e generalizar resultados.  |
| 1970           | Aplicação da teoria (micro)meteorológica convencional para o clima urbano. Uso do balanço de energia como um arcabouço para explicar o efeito urbano. Observação de variáveis de “processo”: radiação, fluxos estimados. Uso de técnicas de modelagem computacional. Definição mais rigorosa de superfície urbana, escala urbana e de observação do efeito urbano. |
| 1980           | Adoção de uma abordagem experimental: Selecionar formas urbanas comuns (ruas tornam-se canyons). Uso de modelos físicos em escala e medições diretas dos fluxos.   |
| 1990           | Relações entre formas urbanas reais e efeito climático. Projetos do campo urbano examinados por times de pesquisa. Generalizações baseadas em uma variedade de ambientes construídos.  |
| 2000           | Desenvolvimento de modelos climáticos urbanos realísticos. Emprego de técnicas singulares para examinar o clima urbano.  |

Fonte: Adaptado de Mills (2014).

Os primeiros estudos foram baseados em observações dos elementos climáticos, o desenvolvimento tecnológico marcado a partir da década de 1970 permitiu o desenvolvimento das pesquisas que envolviam a utilização de modelos computacionais, atualmente estes modelos em conjunto com as geotecnologias conseguem alcançar representações cada vez mais refinadas.

Também foi a partir desta década que os estudos se disseminaram em maior quantidade pelos países, principalmente nas grandes metrópoles. Porém, as novas abordagens desenvolvidas ao longo das últimas décadas não se sobrepõem à importância da observação por meio de equipamentos meteorológicos convencionais. Enquanto estes equipamentos permitem a observação pontual das variáveis de interesse, os modelos computacionais permitem espacializá-las ao longo da área de estudo, além de gerar cenários e oferecer prognósticos. Portanto, os dados observados permitem refinar e validar os modelos à realidade.

Stewart (2019) chama a atenção sobre a importância de se conhecer a história das pesquisas de clima urbano na formação de uma base concreta que possibilite o avanço de novas abordagens e apresenta duas fases distintas: A fase dos estudos

clássicos (de 1833 até 1980) e a fase dos estudos modernos (da década de 2000 até a atualidade).

Curiosamente a década de 1990 não é citada por este autor, e é subentendido como um período de transição. A fase clássica foi subdividida em 3 períodos: a) descobrimento do campo de estudo (início do séc. XIX até início do séc. XX); b) inovação na metodologia (entre as décadas de 1920 e 1940); e c) avanço do experimentalismo (entre as décadas de 1950 e 1980).

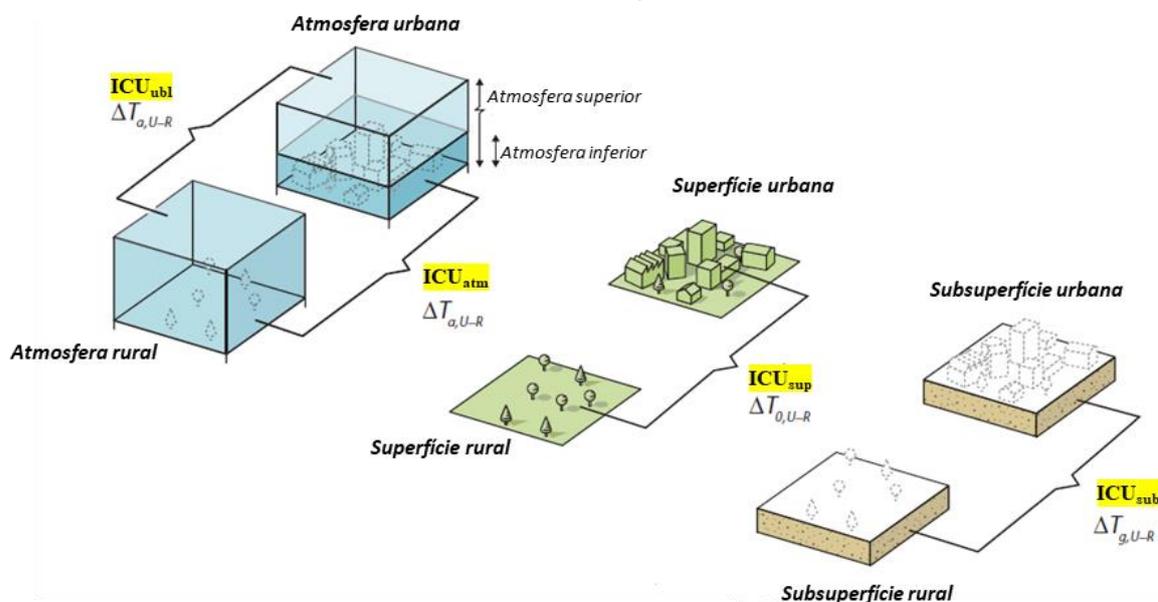
Dentro deste contexto, a **Ilha de Calor Urbana** (ICU) se destaca como o principal fenômeno do CTU e é definida como o gradiente térmico existente entre as áreas urbanizadas e o seu entorno rural, resultante da expansão urbana e das atividades humanas. As principais causas que interagem com a atmosfera e contribuem para a formação da ICU estão sobretudo no saldo de radiação.

Por este motivo, Oke (1982) considera a ICU como uma anomalia térmica com dimensões horizontais, verticais e temporais. Dentro do escopo da ICU, emergem os termos **ilha de frescor** e **efeito parque** (*park cool island*), os quais se referem a locais da malha urbana em que a temperatura é inferior do que aquela registrada na referência rural (ANJOS, M.; LOPES, 2017).

Apesar da compreensão aparentemente simples, Oke et al., (2017) explicam que existem quatro tipos de ICU, cada qual com a sua dinâmica espacial e temporal, o que os tornam metodologicamente complexos. A Figura 1 apresenta os tipos de ICU listados por Oke et al., (2017): a Ilha de Calor Superficial ( $ICU_{sup}$ ), Ilha de Calor da Atmosfera Inferior ( $ICU_{atm}$ ), a Ilha de Calor da Atmosfera Superior ( $ICU_{ubl}$ ) e a Ilha de Calor Subsuperficial ( $ICU_{sub}$ ). Destas, o presente estudo tem como foco a  $ICU_{atm}$ , a qual será referida nos capítulos seguintes simplesmente como ICU.

Oke et al. (2017) detalha que a  $ICU_{sup}$  abrange o gradiente de temperatura entre as superfícies urbanas e rurais e pode ser registrada tanto por meio de sensores fixados nas superfícies quanto por meio de sensoriamento remoto. A  $ICU_{atm}$  é registrada entre o nível do solo e o nível médio das edificações e pode ser identificada por meio de sensores em pontos fixos e/ou transectos móveis. Amorim (2017) define a  $ICU_{atm}$  como “bolsões de ar quente registrados nos ambientes urbanos decorrentes da capacidade diferenciada dos materiais encontrados na superfície de armazenar e refletir a energia solar e a produção do calor antropogênico”.

Figura 1 – Ilustração das diferenças de temperatura formadoras dos quatro tipos de ICU: a ilha de calor de superfície, a ilha de calor da atmosfera inferior, a ilha de calor da atmosfera superior e a ilha de calor subsuperficial.



Fonte: Adaptado de Oke (2018).

A  $ICU_{sub}$  apesar de mencionada por Oke et al., (2017), ainda é pouco explorada na literatura. Por ser relativa à atmosfera inserida no dossel urbano, onde as atividades humanas acontecem, a  $ICU_{atm}$  foi a primeira a ser investigada e ainda é a mais difundida. Durante o período dos estudos clássico foram realizadas as primeiras descobertas e reflexões (generalizações) acerca da  $ICU_{atm}$ , apresentadas por Stewart (2019) e listadas abaixo:

- As ICU ocorrem em cidades de qualquer tamanho, estrutura, função e localização.
- As ICU ocorrem pelas taxas de resfriamento diferenciais das áreas urbanas e rurais, especialmente próximo do pôr-do-sol; as áreas urbanas resfriam lentamente a noite devido a inercia termal dos materiais construtivos, ao aprisionamento de radiação e fluxo do vento reduzido entre as construções, e produção de calor pelas atividades humanas e industriais.
- A magnitude da ICU aumenta em condições de tempo calmo, claro e seco; seus valores noturnos excedem os diurnos; seus valores em latitudes médias excedem os de latitudes baixas.

- As ICU podem se manifestar como “ilhas de frescor” durante o dia (cidade mais fria do que a referência rural).
- A ICU aumenta a temperatura mínima diária e reduz a amplitude térmica diurna.
- A ICU contém “zonas térmicas” que coincidem com o centro da cidade (mais quente), com o entorno do centro da cidade (fresco) e com a área que circunda a cidade (mais fresco); dentre estas zonas existem picos e depressões térmicas que coincidem com áreas muito ou pouco desenvolvidas e com a distribuição da vegetação.
- A ICU tem implicação prática na agricultura urbana, previsão de tempo, saúde humana, desenho urbano e planejamento de uso do solo.

A observação destas generalizações, de modo a validá-las ou não às singularidades das cidades, é uma característica dos estudos modernos de clima urbano. Embora a ICU necessite da referência rural para ser definida, os estudos recentes levantam o questionamento acerca da definição do **urbano** e do **rural** além da abordagem tradicional do campo e da cidade.

O que antes era compreendido com uma dicotomia (rural *versus* urbano), passou a se apresentar como um *continuum* (rural - urbano) (WANDERLEY, M. De N. B., 2001). Stewart e Oke (2012) discutem a insuficiência da abordagem dicotômica. A atual diversidade paisagística presente (d)entre as cidades assim como a crescente influência da cidade na produção do espaço rural revelam o desafio da representação destes ambientes.

Para superar a subjetividade desta dicotomia, os estudos atuais têm se empenhado em compreender a relação entre a pluralidade paisagística e sua relação com o campo térmico. Pode-se afirmar que a **paisagem**, definida como “a extensão em escala local de terra com características físicas e/ou culturais que foram moldadas por agentes físicos e/ou culturais” (STEWART; OKE, 2012) é a principal categoria de análise nos estudos de ICU.

De forma geral, ela é subdividida de acordo com duas propriedades principais: a **cobertura da superfície** e a **estrutura da superfície**. Portanto, é importante frisar que a análise do clima urbano envolve a análise da paisagem. Foissard et al. (2019) discutem as escalas de abrangência destas propriedades e Lang e Blaschke (2009) apresentam o potencial dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na análise da paisagem.

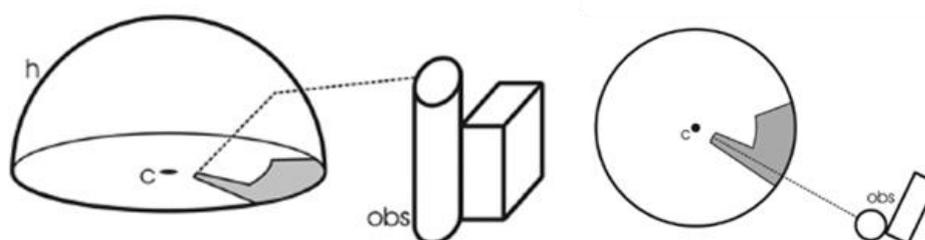
A cobertura da superfície refere-se às características dos materiais superficiais e a capacidade deles em modificar o albedo, a umidade e o potencial de aquecimento e resfriamento do solo (OKE et al., 2017). Os corpos hídricos, a vegetação e as superfícies impermeáveis são exemplos de diferentes tipos de cobertura da superfície.

A estrutura da superfície é relacionada à componente tridimensional e ao arranjo espacial dos elementos urbanos, interagindo diretamente com o fluxo de vento, com o transporte de calor atmosférico e com o saldo de radiação. O **canyon urbano** (OKE, 1981) é a menor unidade da estrutura urbana, formada pelo arranjo comum entre a via e os edifícios adjacentes.

A **razão de aspecto** e o **Fator de Visão do Céu** (FVC) são exemplos de indicadores da estrutura urbana: o primeiro quantifica a relação entre a largura ( $W$ ) e a altura das edificações ( $H$ ) do canyon urbano a partir da razão  $H/W$ , quanto mais verticalizada e densamente construída for a malha urbana, mais estreito é o canyon urbano, menor é a razão de aspecto e maior é a interação da estrutura da superfície com o campo térmico. (OKE, 1981; OKE et al., 2017)

O FVC é definido como a razão da abóbada celeste visível a partir do solo, sem obstruções de construções, relevo ou vegetação (UNGER, 2009) e é associado à razão de aspecto (DIRKSEN et al., 2019). Oke (1981 p.245) define o FVC como “uma razão geométrica que expressa a fração da saída de radiação de uma superfície interceptada por outra superfície”. A Figura 2 ilustra a representação do FVC em relação a abóbada celeste nas perspectivas esférica e bidimensional.

Figura 2 – Representação esférica e bidimensional da abóbada celeste ( $h$ ), o seu ponto central ( $C$ ) e os obstáculos visuais (“obs”).



Fonte: Adaptado de Hämmerle et al. (2014).

Além da cobertura e da estrutura da superfície e suas respectivas propriedades térmicas e materiais, a  $ICU_{atm}$  também pode ser resultante do fluxo de calor antropogênico e do “efeito estufa” urbano. O Quadro 2 apresenta as principais causas da  $ICU_{atm}$ .

Quadro 2 – Lista das causas potenciais da ICU<sub>atm</sub>.

| <b>Causa</b>            | <b>Descrição da causa</b>   |
|-------------------------|---|
| Geometria da superfície | a) Área superficial aumentada.<br>b) Edificações próximas.<br>– Reflexão múltipla e maior absorção de radiação de onda curta (menor albedo).<br>– FVC reduzido e menor perda de radiação de onda longa, sobretudo no período noturno.<br>– Impermeabilidade ao vento que reduz as perdas de calor por convecção e advecção. |
| Propriedades térmicas   | Materiais construtivos frequentemente apresentam maior capacidade de armazenar e liberar tardiamente o calor sensível.  |
| Estado da superfície    | a) A impermeabilização da superfície por meio de edifícios e pavimentação reduz a umidade do solo e a umidade da superfície.<br>A convecção favorece o fluxo de calor sensível sobre o de calor latente.  |
| Calor antropogênico     | Elevada liberação antropogênica de calor devido à queima de combustível e ao uso de eletricidade na cidade.   |
| “Efeito estufa” urbano  | Atmosfera urbana mais quente, poluída e frequentemente mais úmida emite mais radiação de onda longa para a atmosfera.   |

Fonte: Adaptado de (OKE et al., 2017)

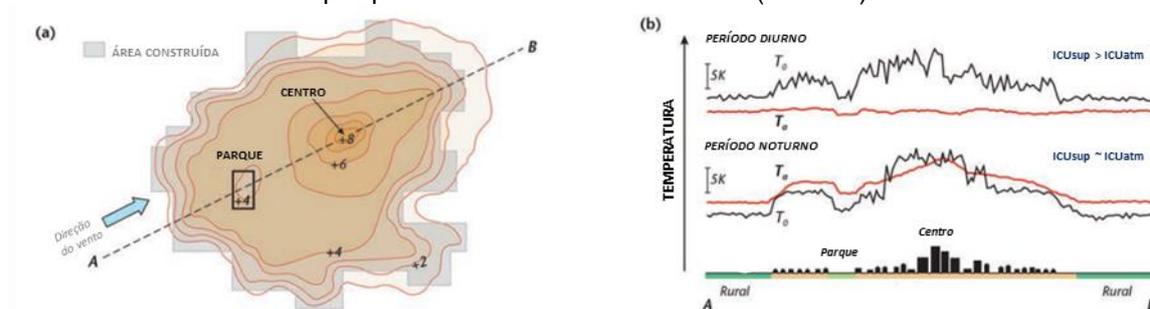
Em geral, a literatura afirma que a ICU<sub>atm</sub> é um fenômeno principalmente noturno e costuma atingir a sua maior intensidade entre seis e sete horas após o pôr-do-sol (OKE, 1981 p.249), porém a variabilidade temporal em fina escala da ICU, com informações espaciais explícitas, ainda é escassa na literatura (YANG *et al.*, 2019).

Na escala sazonal, o comportamento da ICU<sub>atm</sub> pode variar de acordo com o local de estudo. Amorim (2019) afirma que a ICU<sub>atm</sub> é mais intensa nas estações mais úmidas e/ou frias, devido a maior disponibilidade de umidade na atmosfera, o que favorece o processo de evapotranspiração nas superfícies mais úmidas em detrimento do fluxo de calor sensível. Além disto, também há estudos que registram ICU<sub>atm</sub> mais intensa nos períodos mais quentes e secos, devido à maior amplitude térmica favorecida pela umidade reduzida (WU; et al., 2019; JONGTANOM et al., 2011; AMORIM; DUBREUIL, 2017; ZHOU, 2018).

A variabilidade espacial da ICU<sub>atm</sub> depende da diversidade paisagística da malha urbana em questão, mas costuma ser representada como mais intensa à

medida que se aproxima do centro da cidade. A Figura 3 ilustra a variabilidade espacial da  $ICU_{atm}$ .

Figura 3 – Descrição esquemática de  $ICU_{atm}$  ao longo da malha urbana (à esquerda) e seu comportamento diurno e noturno em um transecto que atravessa o entorno rural, a malha urbana, um parque urbano e o centro da cidade (à direita).



Fonte: Adaptado de Oke (2018).

Quanto à classificação da magnitude da  $ICU_{atm}$ , Fernández García (1996) propôs uma abordagem com quatro classes: “Fraca”, “Moderada”, “Forte” e “Muito Forte”, como mostra a Quadro 3. Esta classificação é adotada por diversos estudos de  $ICU_{atm}$  em cidades brasileiras assim como em outros países (AMORIM, 2019; AMORIM e DUBREUIL, 2017; AMORIM, 2020)

Quadro 3 – Classificação de magnitude da ICU.

| Intervalo     | Magnitude   |
|---------------|-------------|
| 0 ° – 2 °C    | Fraca       |
| 2 °C – 4 °C   | Moderada    |
| 4 °C – 6 °C   | Forte       |
| Acima de 6 °C | Muito forte |

Fonte: Fernández García (1996)

Stewart (2011) revisou 190 estudos de  $ICU_{atm}$  publicados entre os anos de 1950 e 2007, a partir desta revisão ele apontou nove critérios básicos a serem seguidos durante a análise, os quais foram utilizados pelo autor para avaliar a qualidade dos estudos revisados. O resultado da avaliação mostrou a existência de duas questões de qualidade recorrentes na maioria dos estudos, traduzidas livremente como: medição controlada e transparência do método. Os nove critérios de qualidade da análise de  $ICU_{atm}$  estão resumidos abaixo:

- O teste operacional do estudo deve estar alinhado com o modelo conceitual da  $ICU_{atm}$ , requerendo medição de temperatura do ar abaixo do nível médio do telhado.
- As definições operacionais da magnitude da ICU devem ser explicitamente declaradas no relatório ou tornadas implícitas na discussão ou apresentação de dados.
- As especificações do instrumento (incluindo tipo, montagem e precisão) são explicitamente declaradas no relatório ou tornadas implícitas por meio de discussão ou apresentação de dados.
- Os metadados da área de estudo devem estar detalhados de forma apropriada. Estes metadados incluem mapas em escala local ou regional, esboço ou fotografia e um ou mais indicadores quantitativos da superfície, como a rugosidade e cobertura do solo.
- As configurações de microescala dos locais de coleta de dados devem ser representativas do entorno local.
- O número de observações de ICU replicadas devem ser suficientemente grande para atender aos objetivos declarados do estudo e para produzir estimativas representativas e confiáveis da magnitude da ICU.
- Os efeitos externos do clima na magnitude da ICU são controlados passivamente. Os cálculos da magnitude da ICU usam temperaturas medidas em um clima relativamente estável: sem frentes de passagem, forte advecção ou precipitação.
- Os efeitos externos do relevo da superfície, elevação e corpos d'água na magnitude da ICU são suficientemente pequenos ou suficientemente reconhecidos por meio de discussão de seus efeitos nas magnitudes observadas.
- As temperaturas usadas para quantificar a magnitude da ICU devem ser medidas de forma síncrona. Heterogeneidades resultantes de medições não síncronas devem ser reconhecidas como tais e ajustadas para um tempo base comum.

Como a atual fase dos estudos de ICU é marcada por uma maior quantidade de produção e uma maior liberdade na autenticidade dos procedimentos

metodológicos, seguir estes critérios garante a qualidade dos resultados, permite que os resultados de diferentes estudos em diferentes cidades sejam comparados e que, conseqüentemente, as particularidades locais da ICU sejam mais compreendidas e divulgadas na literatura.

As geotecnologias são cada vez mais utilizadas pelos estudos de ICU, tanto pela possibilidade de processamento de longas séries de dados atmosféricos georreferenciados quanto pela sobreposição destas séries às múltiplas camadas de superfície, possibilitando a otimização da análise espacial por meio de técnicas estatísticas e de SIG.

Rizwan et al., (2008) revisaram as técnicas utilizadas nas análises e na mitigação da ICU; RASUL et al., (2017) apresentam uma revisão sobre a utilização de sensoriamento remoto nos estudos de ICU e REN et al., (2011) revisaram os progressos realizados nos mapeamentos climáticos urbanos.

A modelagem por meio da regressão espacial múltipla faz parte do conjunto de técnicas de análise utilizadas na estimativa da distribuição espacial da ICU. Há uma diferença conceitual existente entre o modelo espacial multicritério e o modelo por meio da regressão espacial múltipla.

Apesar de ambos serem utilizados em SIG e de poderem ser aplicados em estudos de ICU, o primeiro se dedica ao processo de tomadas de decisão baseada na elaboração de critérios para o planejamento urbano (ELLEN *et al.*, 2016; MALCZEWSKI, 1999; MARDLE, 2002) e o segundo é voltado à estimativa da distribuição espacial da ICU a partir de um conjunto de dados amostrais (AMORIM, 2020b; AMORIM; DUBREUIL, 2017; DUBREUIL et al., 2002; FOISSARD, 2016; GOMES et al., 2017).

Os desafios dos estudos futuros de ICU são diversos, com destaque para o foco em parâmetros de desenho e planejamentos urbanos (RIZWAN ET AL., 2008); no desenvolvimentos de modelos de representação (MIRZAEI, 2015), em compreender a interação da ICU com outros fenômenos climáticos, como as ondas de calor (KILBOURNE, 1997) e as mudanças climáticas (FOISSARD, 2016; KHAN et al., 2021), e em compreender a interação da ICU com a saúde pública e com as condições demográficas locais (MITCHELL, 2017).

Estes desafios são ainda maiores nas cidades tropicais devido à diversos fatores, como a maior instabilidade atmosférica destes ambientes, a maior intensidade dos efeitos previstos das mudanças climáticas, o processo de expansão urbana

carente de planejamento urbano adequado e as maiores desigualdades socioespaciais encontradas nestes ambientes.

Khan et al. (2020) alerta sobre a necessidade dos estudos voltados a cidades tropicais e lista os pontos chaves para realização destas pesquisas, apresentados no Quadro 4, as quais variam desde a compreensão das variáveis do saldo de radiação na superfície até a organização de programas de mitigação em conjunto com a conscientização da população.

Quadro 4 – Os pontos chaves das pesquisas de ICU nas cidades tropicais.

| <b>Recomendação</b>   | <b>Pontos chaves a serem alcançados</b>   | <b>Impacto dos resultados</b>   |
|---|---|---|
| Estimativa a longo prazo das componentes de fluxo de calor que controlam o saldo de radiação na superfície. | Compreender as componentes do saldo de radiação na superfície para cidades tropicais ao longo do ano (dias, estações e variabilidade interanual).                                     | Contribuição de cada componente do saldo de radiação na superfície no desenvolvimento de diferentes tipos de ICU. |
| Coleta de dados atmosféricos e ambientais a longo prazo para validação de simulação                         | Configuração e instalação dos instrumentos para monitorar, medir e observar dados na superfície.  | Geração de banco de dados para validação, avaliação e aprimoramento dos resultados de simulações.                 |
| Simulação multiescalar da ICU   | Simulações numéricas da ICU e validação dos resultados  | Eficácia de diferentes estratégias e tecnologias de mitigação para reduzir a temperatura do ar.                   |
| Desenvolvimento e uso de diferentes estratégias e tecnologias de mitigação                                  | Desenvolvimento de estratégias e tecnologias adequadas para alcançar o albedo esperado para reduzir o efeito direto da radiação solar e para aumentar a o conforto térmico biofísico. | Desenvolvimento de estratégias e tecnologias para contrabalancear a ICU.  |

| <b>Recomendação</b>   | <b>Pontos chaves a serem alcançados</b>   | <b>Impacto dos resultados</b>  |
|---|---|--|
| Experimentos de outras estratégias de mitigação, assim como a manipulação da geometria urbana, do canyon urbano, da geometria das ruas e da participação industrial da morfologia urbana. | Implementação de outras estratégias de mitigação para melhorar o efeito da ICU.   | Demonstração dos efeitos de estratégias de mitigação.  |
| Participação industrial   | Medidas adequadas de mitigação a serem produzidas pela colaboração com parceiros industriais  | Novas oportunidades industriais no desenvolvimento de medidas de mitigação e na geração de empregos. |
| Campanhas e programas de conscientização  | Organização de programas e campanhas de conscientização para encarregar os usuários finais e os moradores urbanos a adotarem as medidas de mitigação. | Inspirar os moradores a seguirem as medidas de mitigação   |

Fonte: Adaptado de Khan et al. (2020).

As medidas de mitigação e adaptação da ICU estão sendo cada vez mais abordadas pela literatura (GAGO *et al.*, 2013; GARTLAND, 2010). Leal Filho et al. (2018: p.15) afirmam que elas são fundamentalmente baseadas na redução da temperatura do ar através do aumento do albedo ou da evapotranspiração, como: priorizar revestimentos claros nas superfícies, modificar o desenho urbano para favorecer o fluxo de vento, aumentar a quantidade da cobertura vegetal e da cobertura hídrica.

De forma geral, essas medidas envolvem intervenções nas propriedades físicas da paisagem urbana, fazendo com que a exposição da cidade aos efeitos nocivos da ICU seja reduzida. Porém, a paisagem urbana também é composta por agentes culturais (que envolvem a dimensão social) e a ICU é um fenômeno que impacta de maneiras diferentes populações que apresentam características distintas.

Portanto, dentre as medidas de mitigação e adaptação à ICU, é preciso também desenvolver meios de compreender como a ICU interage com a dimensão social da

paisagem urbana, de modo a incluir a sensibilidade e a capacidade de adaptação da sociedade aos seus impactos. O próximo capítulo aborda os conceitos de vulnerabilidade, como perpassam os fatores físicos e sociais e como eles podem ser incorporados aos estudos de ICU.

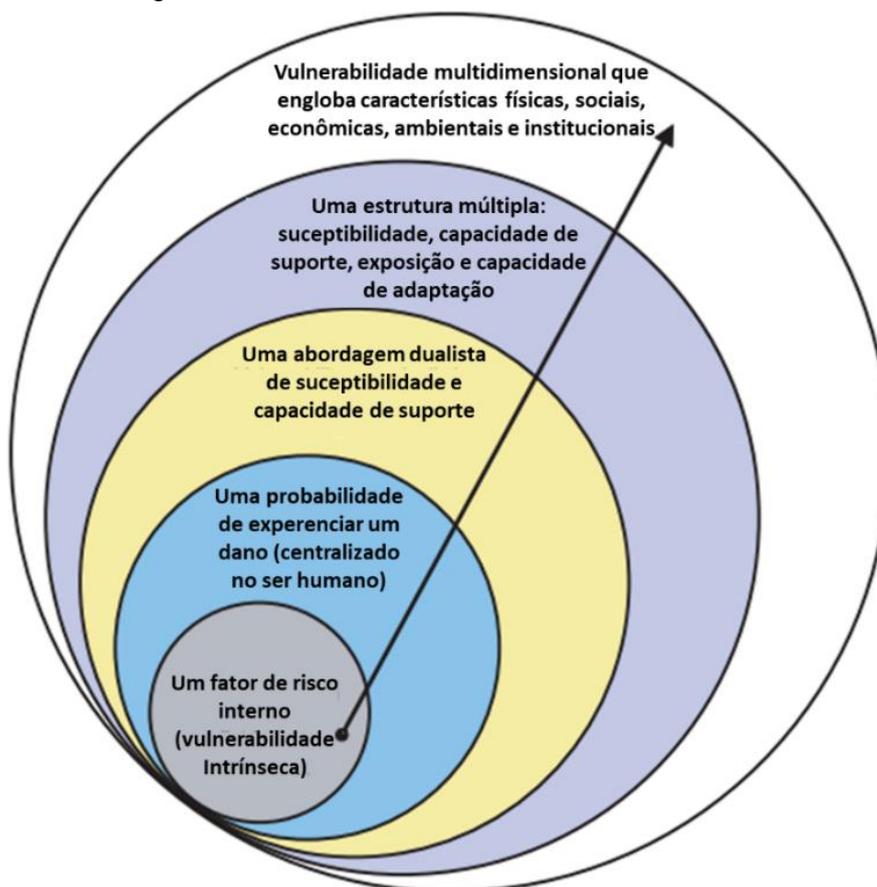
## 2.2 OS CONCEITOS DE VULNERABILIDADE E O SEU CONTEXTO NOS ESTUDOS DE ICU

“A **Vulnerabilidade** é o potencial de sofrimento de uma perda ou um dano.” (CUTTER, 1996).

Cidade (2013) descreve o desenvolvimento do conceito de vulnerabilidade e esclarece que a sua aceção mais explícita se estabeleceu somente a partir da década de 1980, ainda de maneira muito diversa. Cutter (1996) explica que “a vulnerabilidade pode trazer diferentes significados para diferentes pessoas” devido às diferentes orientações epistemológicas e suas subseqüentes práticas metodológicas.

Birkmann (2005) apresenta as esferas de evolução do conceito de vulnerabilidade ao longo do tempo (Figura 4), os quais variam desde a concepção do risco até uma compreensão multidimensional de características físicas, sociais, econômicas, ambientais e institucionais.

Figura 4 – As esferas do conceito de vulnerabilidade.



Fonte: Adaptado de Birkmann (2005).

Dentro desta evolução de conceitos, Cutter (1996) apresenta uma lista de definições e explica que ela pode ser compreendida em 3 temas distintos: a vulnerabilidade como uma exposição ao risco; a vulnerabilidade como uma resposta social e; a vulnerabilidade dos lugares. Estes temas foram respectivamente associados por Cidade (2013) às definições de vulnerabilidade físico-ambiental, vulnerabilidade social e a vulnerabilidade socioespacial.

A **vulnerabilidade físico-ambiental** envolve os aspectos do meio físico relacionados à probabilidade de ocorrência de um evento e é definida como “o grau de susceptibilidade ao impacto de eventos perigosos” (CIDADE, 2013). Por exemplo, a ocupação humana em um local de risco e o grau de perda material associada a ocorrência de um determinado evento ambiental.

O conceito da **susceptibilidade** é fortemente ligada à compreensão da vulnerabilidade físico-ambiental, pois envolve a disposição de um determinado ambiente em receber um determinado evento ambiental. Um sistema é vulnerável se

ele for **susceptível** aos efeitos das mudanças ambientais e incapaz de lidar com eles (LEAL FILHO ET AL., 2018).

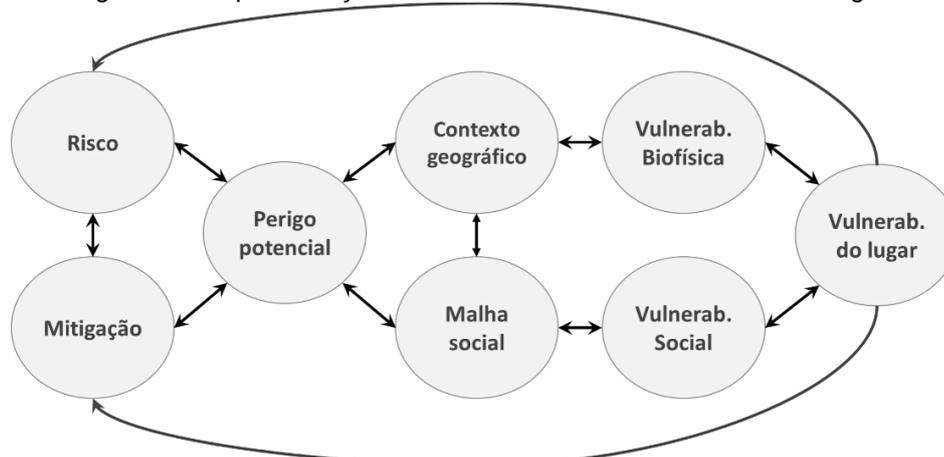
A **vulnerabilidade social** é “parcialmente o produto das desigualdades sociais - dos fatores sociais que influenciam ou moldam a susceptibilidade de vários grupos ao dano e que também governam as suas habilidades de resposta” (CUTTER et al., 2003). A pobreza, desigualdades, marginalização e a qualidade de acesso à habitação e à saúde são exemplos de fatores da vulnerabilidade social (MANIK; SYAUKAT; 2017: p.3).

A **vulnerabilidade socioespacial** envolve os processos espaciais de modo a englobar tanto aspectos físicos quanto sociais, ou seja, abrange os dois temas anteriores no contexto de um domínio geográfico específico.

Esta vulnerabilidade apresenta termos análogos, possivelmente devido às diferentes orientações dos autores ou até mesmo por inconsistências nas traduções. O presente estudo fará uso do termo vulnerabilidade socioespacial e indicará quando alguma referência estiver adotando um termo análogo. A Figura 5 ilustra o carácter integrativo da vulnerabilidade socioespacial e apresenta conceitos-chaves relacionados.

O **risco** é definido como a probabilidade de ocorrência de um perigo enquanto a **mitigação** é o esforço para reduzir o risco. O **perigo potencial** representa a combinação do risco e da mitigação, ou seja, um risco pode ser atenuado quando não há medidas efetivas de mitigação. O **tecido social** e o **contexto geográfico** são os dois filtros do perigo potencial e embasam respectivamente a vulnerabilidade social e a vulnerabilidade físico-ambiental (análoga à vulnerabilidade biofísica).

Figura 5 – Representação de um modelo de vulnerabilidade do lugar.



Fonte: Adaptado de Cutter (1996).

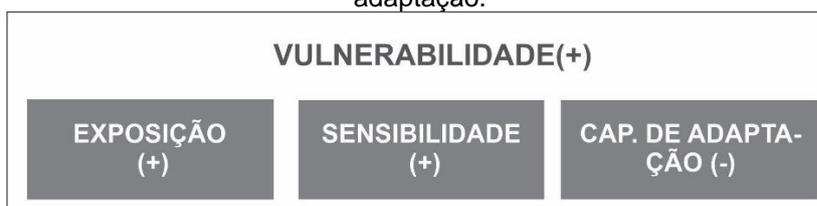
A interseção dessas duas vulnerabilidades resulta no grau de vulnerabilidade socioespacial a qual, quando analisada, fornece um parecer de retorno para o risco e a mitigação. Para exemplificar a importância do parecer de retorno, Birkmann (2007) explica que identificar e medir os riscos e as vulnerabilidades antes da ocorrência de um desastre – assim como após a ocorrência – são tarefas essenciais para uma redução efetiva dos riscos a longo prazo.

Segundo Cutter (1996), o tratamento da vulnerabilidade socioespacial se aproxima mais da geografia devido a sua abordagem integrativa e ao seu foco espacial. A avaliação da extensão na qual as comunidades estão vulneráveis às condições de mudanças ambientais e a identificação das medidas de adaptação a serem tomadas é identificada como **avaliação de vulnerabilidade**. (MANIK; SYAUKAT, 2017).

Neste sentido, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês: Intergovernmental Panel on Climate Change) explica a vulnerabilidade como o grau em que um sistema está suscetível a, ou incapaz de lidar com, efeitos adversos de eventos extremos, sendo uma função de três componentes: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação (IPCC, 2007).

A **exposição** representa a extensão na qual um sistema está sujeito a um fenômeno atmosférico; a **sensibilidade** expressa o grau em que um sistema é afetado (tanto de forma positiva ou negativa) por eventos climáticos e; a **capacidade de adaptação** é a capacidade em mitigar o perigo e em reduzir ou anular o seu impacto (IPCC, 2007). A Figura 6 ilustra estas três componentes: quanto maior for a exposição e a sensibilidade e menor for a capacidade de adaptação, maior é a vulnerabilidade.

Figura 6 – A vulnerabilidade e as suas três componentes: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação.



Fonte: A autora (2021)

Para compreender melhor como estas componentes contribuem no grau de vulnerabilidade, pode-se considerar uma população de idosos: A sensibilidade deste grupo ao calor é geralmente elevada, levando-o a ser um grupo de risco. A exposição

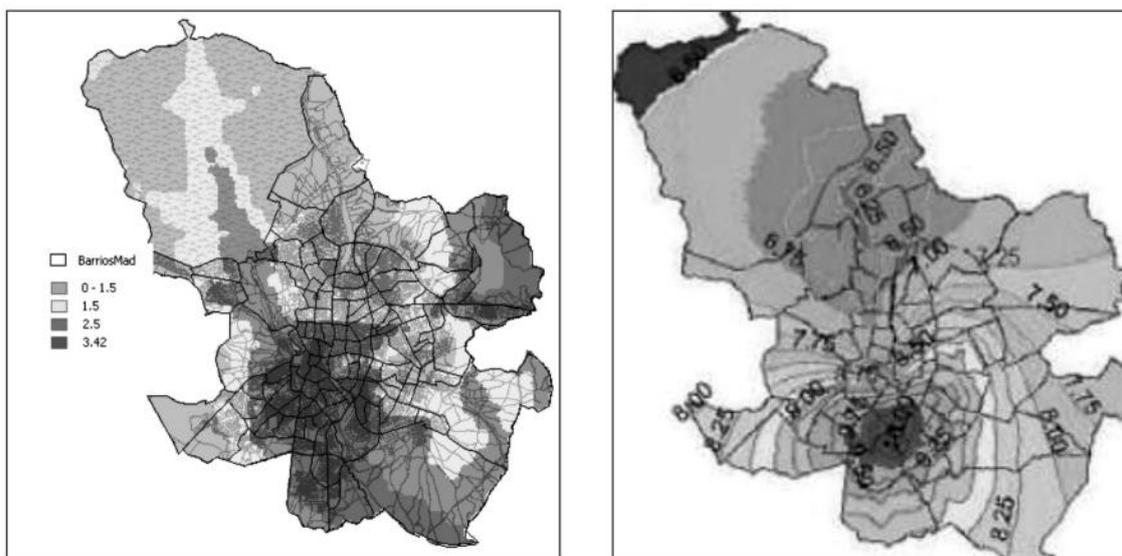
deste grupo à ICU é reduzida se a sua população habitar em áreas distantes do núcleo da ICU (por exemplo: no entorno rural, ou em áreas bem arborizadas e com baixa verticalização). Mesmo se este grupo habitar no núcleo da ICU, ou em suas proximidades, o seu grau de vulnerabilidade é reduzido se eles habitarem em locais climatizados e permanecerem em casa no período de maiores intensidades de ICU, ou seja, eles apresentam maior capacidade de adaptação.

Berry et al. (2013), representando a Organização Mundial de Saúde (OMS), indicam lactantes, crianças, mulheres grávidas, idosos, pessoas com transtornos médicos crônicos, categorias socioeconômicas empobrecidas e trabalhadores ao ar livre como os grupos mais vulneráveis às temperaturas elevadas.

Carolis (2012: p.09) detalha o impacto da ICU sobre estes grupos e explica que a ICU pode estar relacionada ao desenvolvimento de doenças (como edemas, erupções, exaustão e insolação), à propagação de doenças infecciosas e à ocorrência de mortes.

Fernández García (2009) explica que a mortalidade na cidade de Madrid teve um aumento de 40% no verão do ano de 2001 devido à ocorrência de onda de calor. Ao observar a distribuição espacial da mortalidade por bairros, foi constatado que o impacto foi maior nos locais de maior intensidade de ICU (Figura 7).

Figura 7 – Distribuição espacial da mortalidade (esquerda) e intensidade da ICU (direita) durante a onda de calor de 2003 na cidade de Madrid.



Fonte: Felipe Fernandez (ilha de calor); García e Alberdi (mortalidade): apresentados por Fernández García (2009).

No contexto do clima urbano, Mitchell (2017) destaca que a ICU tem atraído pouca atenção das análises de vulnerabilidade em relação aos demais fenômenos atmosféricos. CHOW et al. (2012: p.290) afirmam que as mudanças nas condições da superfície acompanhadas pela rápida urbanização mudaram profundamente a paisagem local, a demografia e o ecossistema, com consequências potenciais à vulnerabilidade ao calor.

O canal termodinâmico interage diretamente com a qualidade de vida da população, porém a variação da temperatura costuma ocorrer de forma mais amena em comparação aos eventos pluviométricos, principalmente em locais que apresentam climas tropicais úmidos e litorâneos, no qual a cidade do Recife está inserida.

Isto faz com que os danos causados pelos eventos pluviométricos sejam mais perceptíveis e quantificáveis do que os danos causados pelo estresse térmico. Por exemplo, Luber e Mcgeehin (2008) julgam as ondas de calor como “assassinas silenciosas” por se apresentarem como desastres naturais que não deixam rastros de destruição. Segundo este autor, esta inexistência de “rastros” se dá pela carência de reconhecimento público em relação à ameaça da exposição prolongada às altas temperaturas. Estes autores quantificaram 3.442 mortes relacionadas ao calor nos Estados Unidos em um intervalo de cinco anos.

Icaza et al. (2016) explicam que ainda é necessário incorporar a ICU (dentre outras características do clima urbano) ao planejamento urbano. Leal Filho et al. (2018) discute métodos de avaliação de vulnerabilidade à ICU e afirma que nos países em desenvolvimento ela é fortemente ligada à fatores socioeconômicos. Manik; Syaukat (2017) afirmam que a ICU tem o potencial de se tornar um dos maiores problemas associados à urbanização e à industrialização, uma vez que a tendência de aumento da temperatura global associada à ICU aumentam as ameaças à saúde pública.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são um importante aliado na avaliação da vulnerabilidade à ICU, pois possibilitam a sobreposições de informações georreferenciadas, possibilitando a identificação de intersecção de valores críticos das componentes da vulnerabilidade.

Carolis (2012) avaliou a vulnerabilidade socioespacial à ICU da cidade de Windsor a partir do mapeamento da ICU e posterior sobreposição aos dados socioeconômicos, priorizando informações censitárias acerca dos grupos mais

vulneráveis. A Análise Fatorial (AF) exploratória, baseada na Análise de Componentes Principais (ACP) assim como demais ferramentas estatísticas, são comumente utilizada para desenvolver índices de vulnerabilidade em conjunto com os SIG (TATE, 2012).

Para calcular a exposição, as técnicas de análise espacial sintetizam as características da paisagem e os dados atmosféricos, de modo a indicar as intensidades da ICU ao longo do domínio espacial (BHATTACHARJEE *et al.*, 2019). A sensibilidade e a capacidade de adaptação costumam ser analisadas a partir de dados sociodemográficos, por exemplo: idade, gênero e comorbidades (para sensibilidade) e educação, renda, estrutura do domicílio e seu entorno (para capacidade de adaptação) (LEAL FILHO *et al.*, 2018; MANIK TUMIAR KATARINA; SYAUKAT SYARIFAH, 2015).

Para integrar estas componentes em SIG, os dados sociodemográficos são comumente normalizados, ponderados, relacionados a uma unidade espacial e ajustadas a uma escala adequada de representação (GAMBLE *et al.*, 2018).

Apesar da literatura acerca da vulnerabilidade à ICU ainda ser escassa, Leal Filho *et al.* (2018) comparam os métodos abordados por sete estudos, destacando suas ferramentas, conceitos, similaridades e discordâncias. Estes autores apontam estratégias de mitigação aos efeitos da ICU e afirmam que é necessário adotar estratégias que consideram as particularidades de cada cidade, para que elas se tornem mais resilientes.

A análise de riscos e vulnerabilidades climáticas realizada pela Prefeitura Municipal do Recife (RECIFE, 2019) com o apoio do Banco de Desenvolvimento da América Latina (e demais parceiros) abordou o risco climático desta cidade. Foram identificados os bairros mais vulneráveis diversos impactos climáticos no contexto das mudanças climáticas (incluindo ondas de calor).

Apesar da relevância desta análise, deve-se observar as diferentes escalas de representação (tanto temporal quanto espacial). Os estudos de mudanças climáticas envolvem a análise de cenários de mudanças ambientais globais previstos para longos intervalos de tempo.

A avaliação da vulnerabilidade socioespacial à ICU constrói um panorama das questões a serem enfrentadas na escala local e no momento atual, sem competir com as demais análises, mas acrescentando uma nova abordagem com potencial integrativo e complementar. Pois une as dimensões social e físico-ambiental na

mesma abordagem sob a compreensão de que a ICU não é um fenômeno isolado e seus efeitos podem interagir com os efeitos das mudanças climáticas (como as estimativas de mudanças de frequência e intensidades das ondas de calor).

### 2.3 OS ESTUDOS DE CLIMA URBANO NA CIDADE DO RECIFE E SEUS DESAFIOS

A formação do espaço urbano do Recife esteve (e continua estando) intrinsecamente relacionada tanto com o clima local quanto o clima regional. Pontual (2001) explica que até a última década do século XIX os espaços compactamente urbanos do Recife eram limitados aos bairros do Recife, São José e Santo Antônio.

Os bairros de Boa Vista e Santo Amaro apresentavam áreas urbanizadas esparsas, enquanto os demais bairros eram compostos por povoados rurais dos antigos engenhos de cana-de-açúcar e, na orla marítima, por vilas de pescadores e plantações de côco. Na planta da cidade do Recife de 1906 (Figura 8) percebe-se o contraste entre a então malha urbana central, a periferia e o seu entorno rural. Santos (2014) apresenta uma discussão sobre o modelo de ocupação da cidade do Recife.

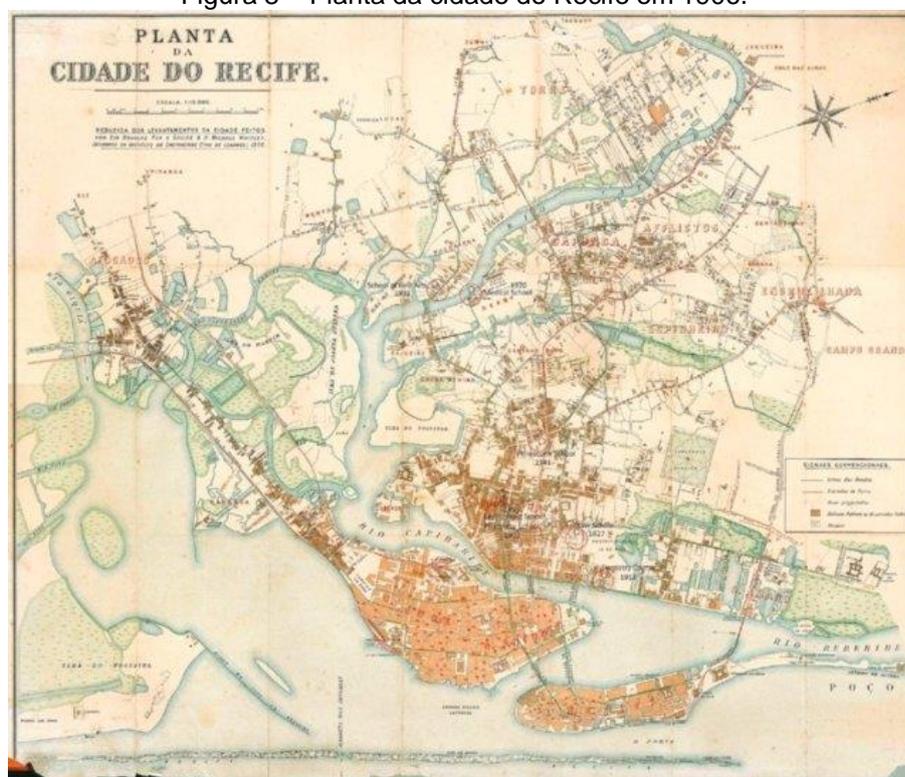
As secas severas que ocorreram no início do século XX na Região Nordeste do Brasil (NEB) propiciaram a explosão demográfica do Recife, decorrente da migração de milhares de pessoas que habitavam o semiárido nordestino. Esta população recém-chegada, impelida pela seca, habitou os mocambos situados em manguezais e áreas alagadas, permanecendo sob vulnerabilidade ambiental. Enquanto em 1913 foram registrados 16.347 mocambos em Recife, no ano de 1939 este número subiu para 45.581, totalizando 63,7% dos imóveis nesta cidade (PONTUAL, 2001).

As secas são um fenômeno natural e recorrente no interior da NEB, assim como os eventos pluviométricos intensos/extremos também são recorrentes no litoral desta região, onde Recife se situa. A cidade do Recife, em particular, apresenta uma elevada frequência destes eventos. Enquanto a quantidade de mocambos aumentava exponencialmente no Recife, as enchentes registradas no Rio Capibaribe passaram a atingir um número cada vez maior de pessoas.

As reformas urbanísticas<sup>1</sup> que ocorreram no Recife até a década de 1940 objetivavam combater os assentamentos dos mocambos e favorecer a expansão da cidade (SILVA, L. H. Da, 2008). Por consequência, morros que circundam a planície da cidade passaram a ser habitados informalmente pela população mais pobre, acrescentando o risco sob deslizamento de encostas. Pode-se inferir que os primeiros “conflitos” entre a cidade do Recife e o clima foram sobretudo no contexto hidrometeorológico.

Zamparoni et al (2018) apontam episódios históricos de desastres naturais associados à eventos pluviométricos no Recife. A Figura 8 apresenta o mapa da cidade do Recife em 1906 e a Figura 9 o mapa do Recife no ano de 1951, e demonstram a expansão urbana decorrente do crescimento demográfico entre estes anos.

Figura 8 – Planta da cidade do Recife em 1906.

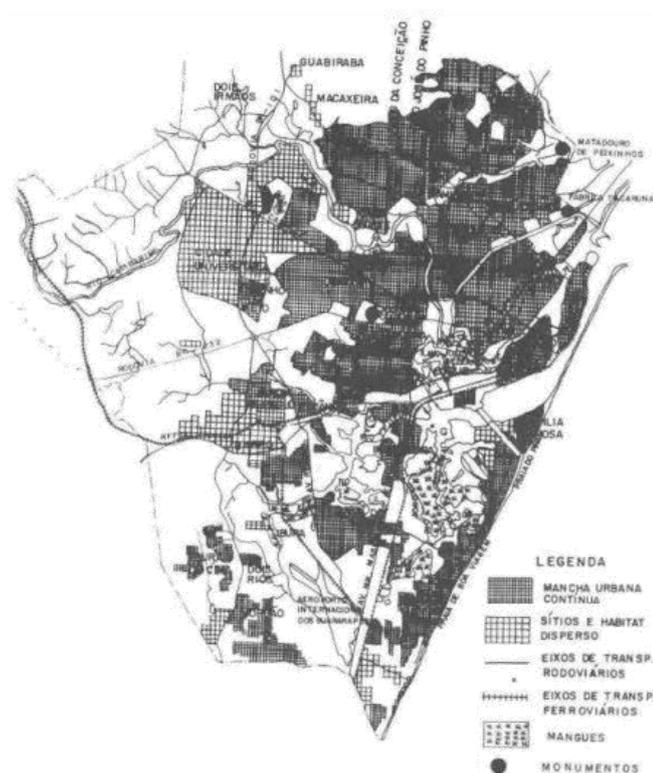


Fonte: URB – Recife.

---

<sup>1</sup> Lei 1.051 de 1919, o decreto nº 374 de 1936, o Plano de Nestor Figueiredo, em 1931 e o Plano de Reforma de Ulhôa Cintra, em 1942 (SANTOS, 2014).

Figura 9– Planta da cidade do Recife em 1951.



Fonte: URB – Recife.

A distribuição espacial decorrente do processo de metropolização do Recife, segundo Silva (2008), ocorreu de forma extensiva e intensiva. “Extensiva, pois o município seguia uma tendência de estender seus limites urbanizáveis. Intensiva, pois houve a substituição dos antigos casarios por edifícios, ocasionando um adensamento vertical, além da saturação dos assentamentos populares.” (SILVA, 2008). Sobre a ocorrência simultânea destes dois processos, Santos (2014) afirma: “A estrutura espacial do Recife não se enquadra num modelo pré-definido, mas compõe uma forma híbrida, ora com características da cidade compacta, ora com características da cidade difusa.”.

A paisagem dos bairros localizados na orla marítima foram revolucionadas e representaram a maior expressão da verticalização no Recife: inicialmente habitados por pescadores e plantações de côco, foram transformadas em local de veraneio partir da década de 1920 (com a construção da Av. Boa Viagem), em poucas décadas passaram a ser uma área residencial e comercial e a partir da década de 1960 já eram consolidados como uma nova centralidade comercial da cidade.

Figura 10 – Três representações da orla de Boa Viagem: uma ilustração de um mocambo da vila dos pescadores e plantações de coqueiro no plano de fundo (a); a Av. Boa Viagem recém finalizada e algumas residências de veraneio (b) e; a atual paisagem urbana resultante do processo de verticalização (c).



Fonte: Acervo da Fundação Joaquim Nabuco (a e b); Imagem extraída da internet (c), disponível em: <https://visitarecife.com.br>.

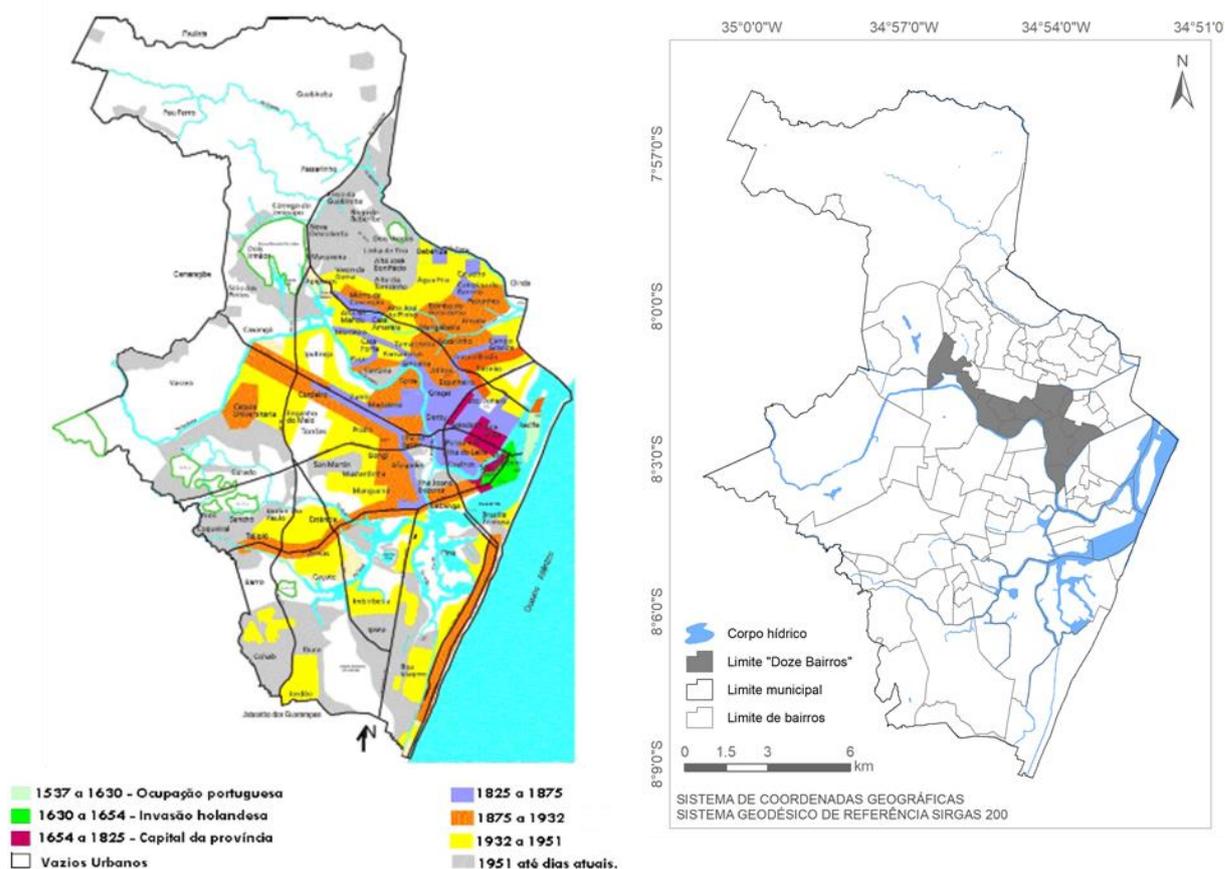
A Figura 11 apresenta (à esquerda) o processo de expansão urbana no Recife desde o Séc. XVI até a atualidade. Além da orla marítima, os bairros localizados na margem esquerda do Rio Capibaribe também foram alvos do processo intensivo de verticalização, atuando como uma extensão do centro da cidade em direção à BR-101.

Porém, ao contrário da orla marítima, estes bairros foram submetidos à intervenção da Lei Municipal nº 16.719, conhecida com a “Lei dos Doze Bairros”, que visa controlar o gabarito das edificações e preservar a paisagem original destes bairros (NUNES, 2008, 2017). A Figura 11 apresenta (à direita) a posição destes bairros no território do Recife.

Apesar da Lei dos Doze Bairros representar uma ação pública frente ao controle da verticalização urbana, Nunes (2017) chama a atenção quanto ao carácter localizado e parcial desta lei. O seu raio abrange 12 dos 94 bairros, correspondendo a 4% da área física do Recife; além disto, atende à reivindicação de uma parcela da população composta por moradores de elevado poder econômico.

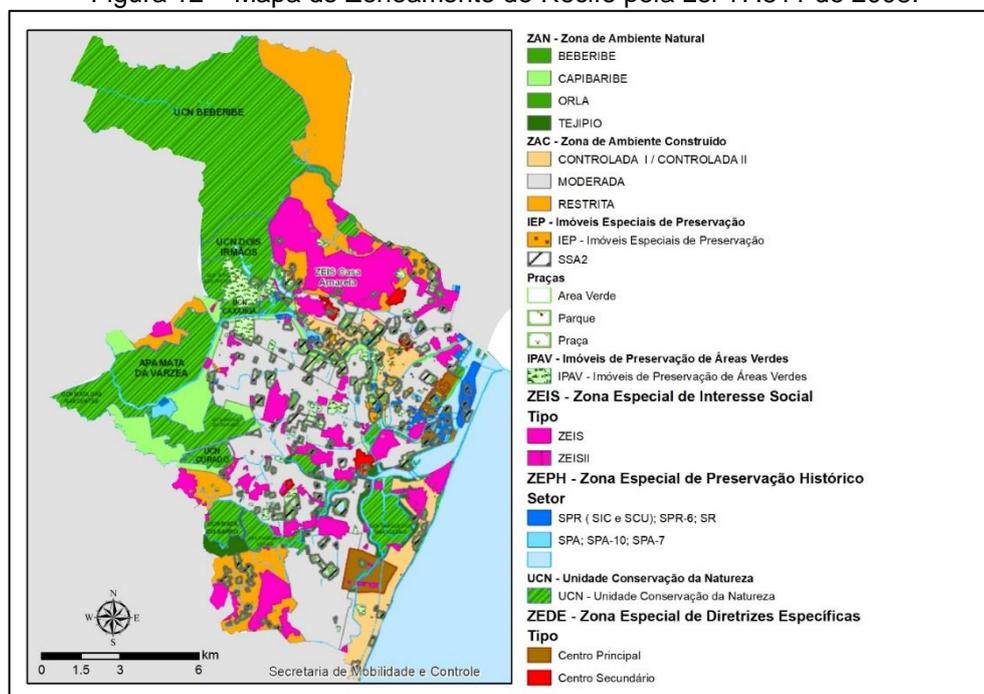
Atualmente, o território do Recife é zoneado pela Lei 17.511 do ano de 2008 em duas zonas principais: a Zona de Ambiente Construído (ZAC), onde predomina a superfície edificada da cidade, e a Zona de Ambiente Natural (ZAN), caracterizada pela presença dos corpos hídricos e de maciços vegetais. O mapeamento destas zonas e dos demais limites do zoneamento contidos nelas estão apresentados na Figura 12.

Figura 11 – À esquerda: Mapa de expansão urbana do Recife. À direita: Localização dos bairros submetidos à “Lei dos Doze Bairros”.



Fonte: Nunes, (2017) e Prefeitura Municipal de Recife respectivamente (Adaptado pela autora).

Figura 12 – Mapa do Zoneamento do Recife pela Lei 17.511 de 2008.



Fonte: A autora (2021). Dados disponibilizados pela Prefeitura da Cidade do Recife (2008) em: <https://esigportal.recife.pe.gov.br/>.

A transformação da paisagem decorrente da expansão urbana do Recife foi baseada no modelo de metropolização das cidades brasileiras, resultando em uma superfície urbana majoritariamente impermeável e artificial e em uma estrutura de canyon urbano, reconhecido pela literatura como o principal agente local na formação da anomalia térmica associada à ICU.

Desta forma, infere-se também que a segunda metade do século XX trouxe um segundo “conflito” marcante entre o Recife e o clima: a formação do Campo Térmico Urbano (CTU) resultante dos processos intensivo e extensivo de crescimento urbano.

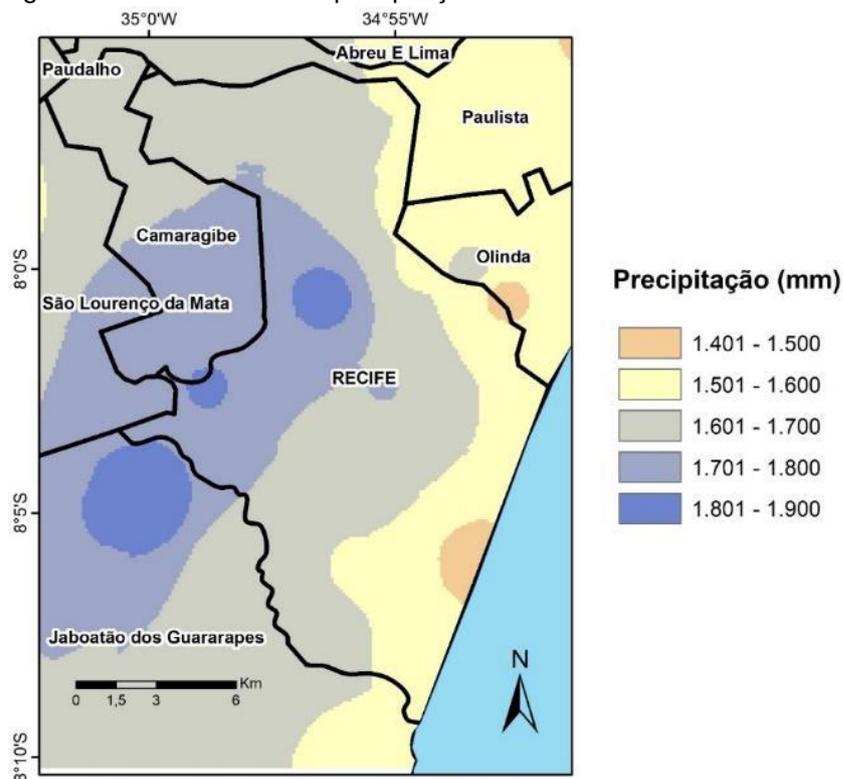
Zanella & Moura (2013) enfatizam que os estudos acerca do clima urbano no Nordeste do Brasil, assim como no Recife, se destacaram após o ano 2000. Este ano também marcou o início do período moderno dos estudos de ICU (STEWART, 2019), explicado no Cap. 2.1.

Atualmente, dentre os estudos relacionados ao campo hidrometeorológico do Recife, Souza et al (2012) contribuíram na compreensão da vulnerabilidade da população do quanto aos impactos dos eventos pluviométricos diários, constatando, dentre outros resultados, que os eventos pluviométricos diários com volume superior a 55,3 mm sempre causam danos à população do Recife. Moreira et al. (2017) realizaram um estudo de caso dos impactos causados por um evento pluviométrico extremo na cidade do Recife.

Wanderley et al. (2018) detalharam a variabilidade temporal, a frequência e o tempo de retorno destes eventos. Foi identificado, por exemplo, que a precipitação diária superior ao limiar de 55,3 mm, mencionado acima por Souza et al. (2012), tem recorrência anual e aqueles com limiar de 112,7 mm apresentam o tempo de retorno de 2 anos. Devido à elevada recorrência temporal destes eventos no Recife, Wanderley et al. (2021) chamam atenção para uso do termo “intensas” em detrimento de “extremas” para qualifica-los.

Quanto à variabilidade espacial da precipitação, Anjos et al. (2020) analisaram dados de 26 postos pluviométricos do Recife e de seu entorno entre os anos de 2015 e 2018 e identificaram uma diferença anual de aproximadamente 500 mm dentro do território do Recife, os bairros mais próximos da orla marítima apresentaram os menores volumes pluviométricos (Figura 13).

Figura 13 – Média anual da precipitação entre os anos de 2015 e 2018.



Fonte: Anjos et al (2020).

A compreensão das variáveis termodinâmicas no Recife ainda se apresenta como um desafio aos pesquisadores: a variabilidade da temperatura do ar e da superfície é muito elevada enquanto a quantidade de pontos públicos de coleta de dados são poucos. Atualmente, conta-se com os dados horários registrados por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e outra da Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC).

Foram realizados estudos em microescala, com equipamentos pessoais (BITTENCOURT, 2006; NÓBREGA & VITAL, 2010). A instalação de termohigrômetros em pontos específicos permite ampliar a investigação para toda a extensão da cidade e fornece dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e de ponto de orvalho correspondentes à morfologias urbanas distintas.

Moreira et al (2012) compararam dados provenientes de 9 termohigrômetros de modo a verificar a influência da morfologia urbana sobre eles. Foram estudados dois períodos de dados contidos no ano de 2014, com 68 e 32 dias respectivamente. Apesar do curto recorte temporal, este estudo apresentou os resultados iniciais sobre os valores de temperatura do ar e de  $ICU_{atm}$  em pontos do Recife.

Santos et al. (2018) e Santos (2017) utilizaram dados de termohigrômetros espacializados com o objetivo de identificar as áreas de maior e menor conforto térmico em diferentes tipos de tempo no Recife a partir do Índice de Temperatura e Umidade (ITU). Os dados foram calculados pontualmente e, em seguida, interpolados.

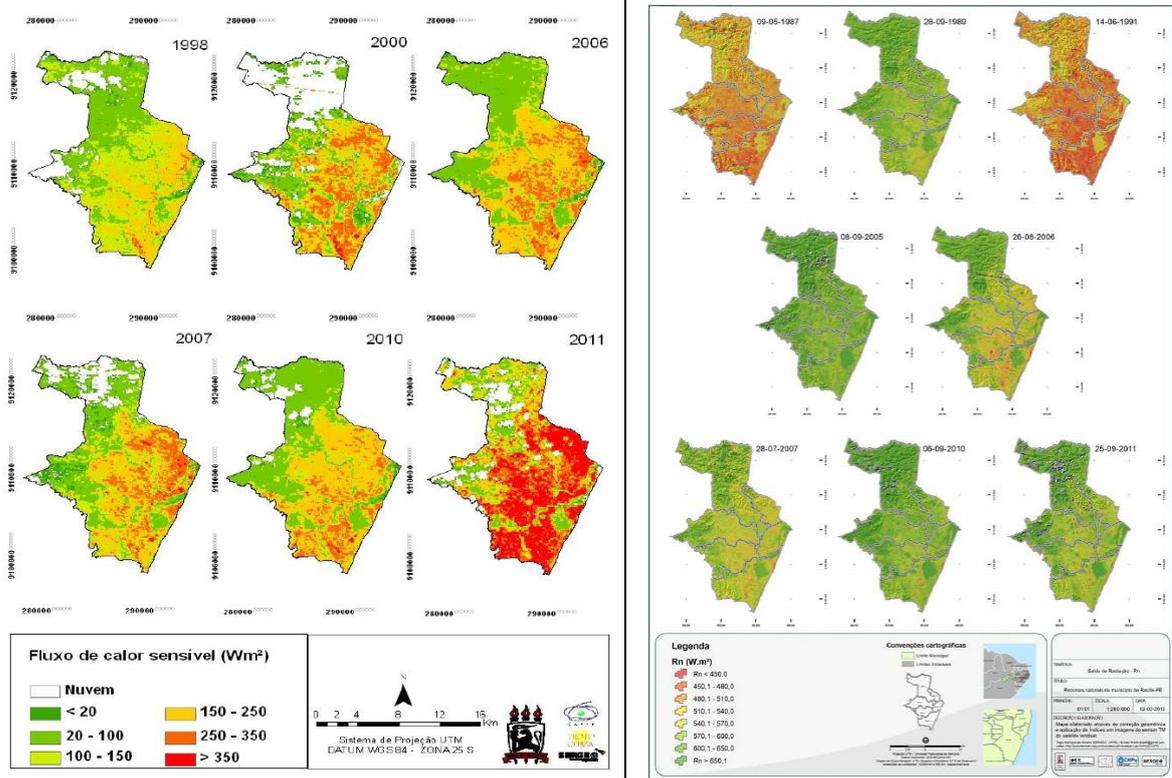
Moreira et al. (2021) discutiu tanto os métodos de obtenção dos valores de Fator de Visão do Céu (FVC) quanto a relação desta componente sobre o clima urbano do Recife, identificando áreas potenciais para o desenvolvimento de ICU e suas relações com a cobertura da superfície e a permeabilidade do canyon urbano ao vento.

A utilização de imagens de satélite são uma alternativa de aquisição de dados de superfície. As imagens da missão Landsat são uma das mais difundidas nos estudos de clima urbano, e possibilitam a aquisição de dados contínuos e séries temporais de cobertura do solo e temperatura da superfície. Porém, existe a dificuldade de aquisição de imagens livres de cobertura de nuvem.

As imagens de satélite são mais adequadas para estudos das propriedades da superfície (como a  $ICU_{sup}$ ), estimar informações atmosféricas delas demanda cálculos complexos (HOOKER et al.; 2018; YU e WU, 2014; ZHU et al., 2017; WINDAHL e BEURS, 2016). Além disto, para estudos que envolvem a  $ICU_{sup}$  a partir de imagem de satélite, é necessário a aquisição de imagens de satélite noturnas, as quais ainda não são disponíveis para a cidade do Recife.

A utilização destas imagens nos estudos do campo térmico do Recife foi realizada por Moreira (2009), o qual comparou o comportamento espacial de variáveis de radiação referentes às imagens diurnas Landsat-5 TM do ano de 1984 e 2007. Santos (2011), Oliveira (2012), Moreira (2013) e Moreira (2014) aplicaram o modelo Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL, em tradução livre: algoritmo de balanço de radiação na superfície para a terra) em séries temporais de imagens Landsat-5 TM, como mostra a Figura 14, e discutiram a relação dos resultados com a superfície urbana do Recife.

Figura 14 – À esquerda: fluxo de calor sensível nos anos de 1998, 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011. À direita: saldo de radiação na superfície nos anos de 1987, 1990, 1991, 2005, 2006, 2007, 2010 e 2011 no Recife.

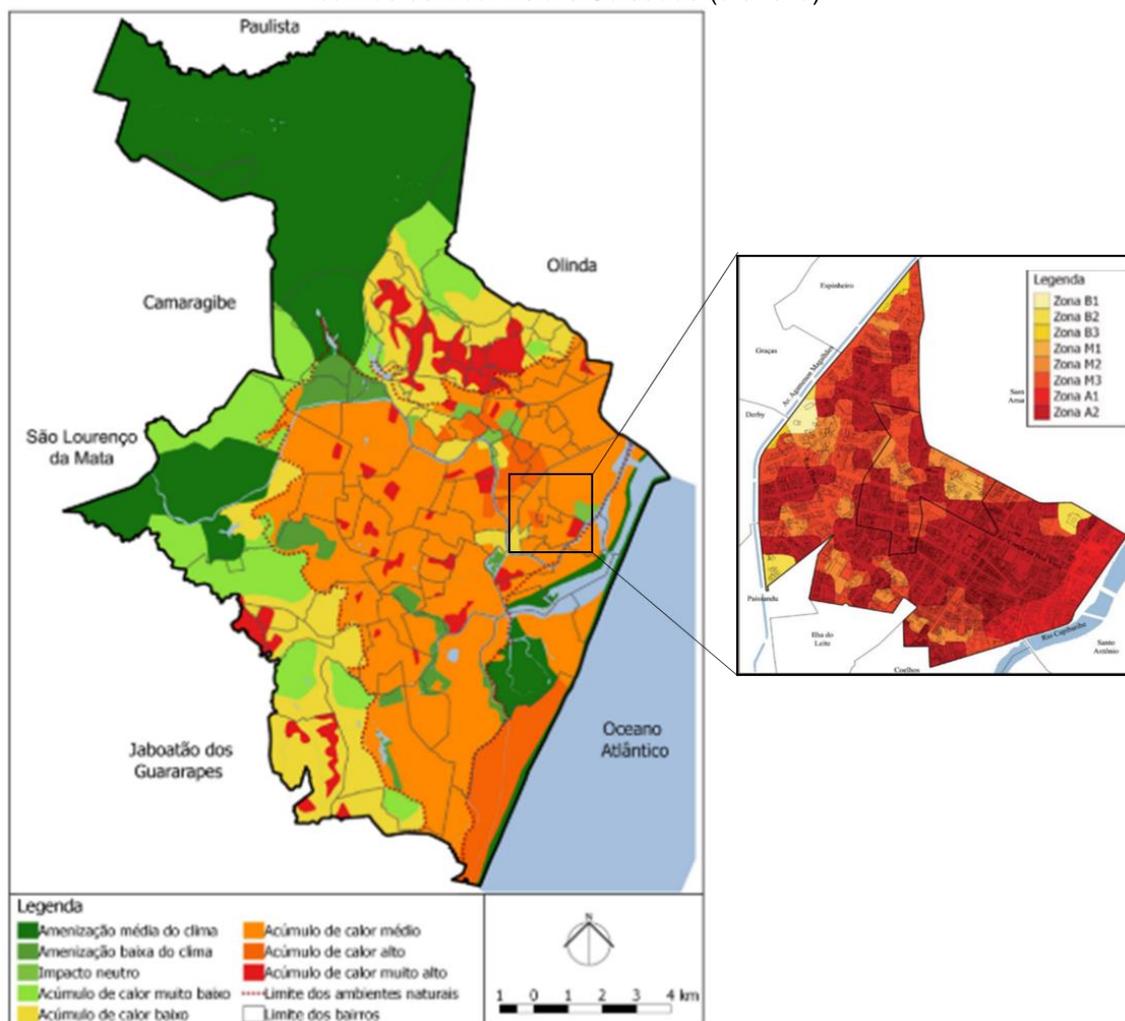


Fonte: Adaptado de Moreira et al (2013) e Oliveira (2012) respectivamente.

Santos (2018) propôs um zoneamento microclimático, com foco no mapeamento de zonas de intensidade de conforto térmico no Recife. Ferreira (2016) estimou dados de temperatura da superfície a partir de imagem do satélite Landsat-8, utilizou dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar de cinco termohigrômetros e os correlacionou com dados demográficos e de notificação de dengue no Recife.

O zoneamento microclimático do Recife também foi recentemente explorado por Freitas et al. (2021), como apresenta a Figura 15. Estes autores utilizaram dados de paisagem e de superfície para a delimitação das zonas, tomando como base a delimitação existente das três macrozonas: a macrozona do litoral, a da planície e a do morro.

Figura 15 – Mapa do zoneamento de oito microclimas de Recife (à esquerda) e microzonas nos bairros de Boa Vista e Soledade (à direita).



Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2021, p. 20; p.23).

O mapa climático resultante foi composto de oito classes climáticas, indicando as áreas dos morros da zona norte, e demais áreas isoladas demarcadas em vermelho (Figura 15), com maior acúmulo de calor. A escala de representação também se apresentou como determinante no nível de detalhamento da representação, como se percebe no detalhamento das microzonas climáticas dos bairros de Boa Vista e Soledade (Figura 15, à direita).

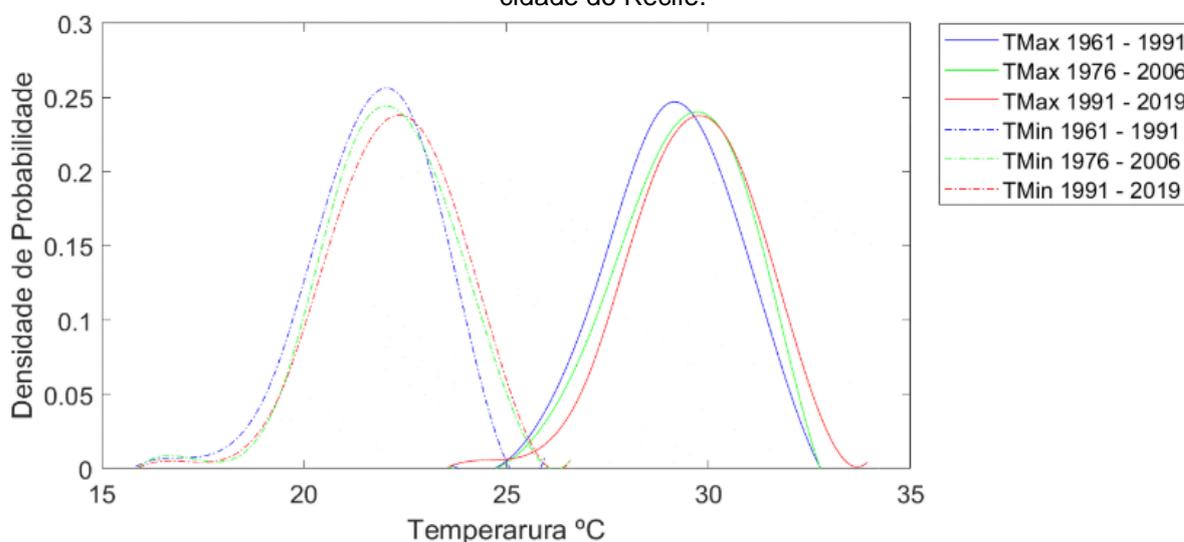
Almeida et al (2018) utilizaram dados de temperatura do ar provenientes de cinco termohigrômetros e os correlacionou com dados de precipitação e de notificações de dengue, Zika e Chikungunya no Recife. Ambos expõem a contribuição da baixa amplitude térmica, elevadas temperaturas e umidade relativa do ar na formação de um ambiente favorável à reprodução dos vetores das arboviroses.

Quanto à variabilidade e às mudanças climáticas, a Prefeitura do Recife desenvolveu uma análise de riscos e vulnerabilidades e listou os bairros mais vulneráveis às inundações, disseminação de doenças e deslizamentos de encostas (RECIFE, 2019). Guedes & Silva (2020) descreveram e avaliaram as mudanças e tendências de temperatura do ar máxima ( $T_{\text{máx}}$ ), temperatura do ar mínima ( $T_{\text{mín}}$ ), umidade relativa do ar (Ur), dentre outras variáveis climáticas na cidade do Recife durante os anos de 1961 e 2019.

Este estudo apontou uma tendência de aumento das temperaturas ( $0.23^{\circ}\text{C}/\text{década}$  para  $T_{\text{máx}}$  e  $0.13^{\circ}\text{C}/\text{década}$  para  $T_{\text{mín}}$ ) e redução da Ur. Com destaque a um indicativo de verões mais quentes e secos, aumentos de dias secos e chuvas mais concentradas.

Ao calcularem a densidade de probabilidade dos valores extremos de temperatura entre 1961 e 2019, Guedes & Silva (2020) também identificaram a probabilidade de aumento dos valores de  $T_{\text{máx}}$  e  $T_{\text{mín}}$  (Gráfico 1). O achatamento dos picos e alargamento das bases das curvas de probabilidade indicam que as anomalias de temperatura no Recife estão ficando mais acentuadas e mais prováveis, resultando no aumento da probabilidade de ocorrência de ondas de calor.

Gráfico 1– Função densidade de probabilidade de temperatura máxima (contínuo) e mínima (pontilhada) das décadas: Azul – 1961 a 1991; Verde – 1976 a 2006; Vermelho – 1991 a 2019 na cidade do Recife.



Medeiros (2020) também aponta resultados similares aos de Guedes e Silva (2020) e adiciona que está ocorrendo um deslocamento dos meses chuvosos desta cidade; tendência negativa de intensidade do vento, tanto reais quanto previstas para

daqui a 5 e 10 anos; madrugadas mais quentes; aumento da insolação; e redução significativa da umidade relativa tanto atuais quanto para daqui a 5 e 10 anos.

Medeiros (2018) investigou o comportamento decadal da insolação, comparando-o à série histórica e constatou um maior desvio positivo desta variável ao longo dos anos, com maior incidência registrada entre os meses de agosto a dezembro.

Até o momento, os estudos voltados às variáveis termodinâmicas no Recife envolveram: a) análise temporal diurna do comportamento das variáveis de radiação na superfície; b) análise de tendências climáticas; c) análises pontuais de ICU; d) análises pontuais de conforto térmico; e) relação entre as variáveis termodinâmicas e a ocorrência de arboviroses; f) mapeamento de zonas climáticas.

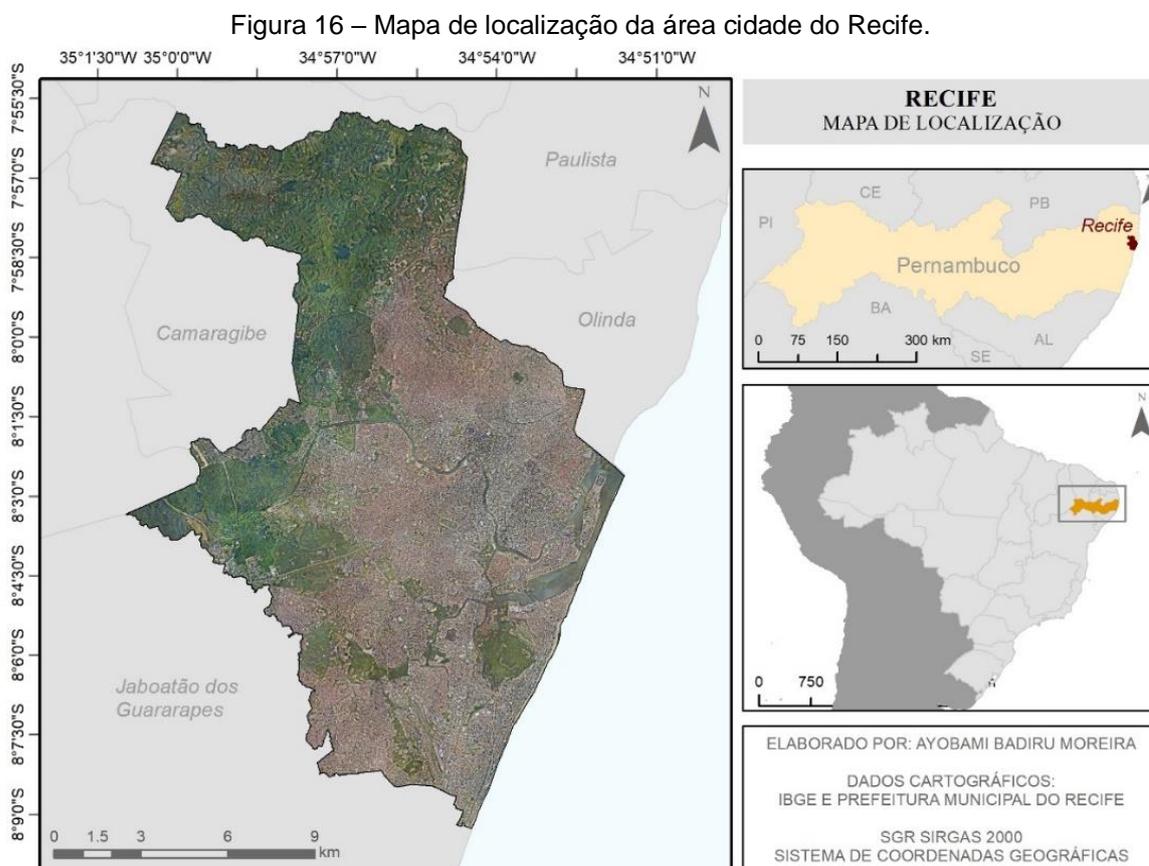
Este texto explicitou a relação de “conflito” entre a cidade do Recife e o clima, decorrentes do impacto ambiental causado pelo processo de expansão urbana. É importante avançar além da análise pontual dos dados climáticos, no sentido de extrapolá-los à toda malha urbana da cidade e explorar o potencial das geotecnologias na análise climática.

Portanto, os futuros (e atuais) estudos de clima urbano no Recife podem enriquecer o entendimento da relação sociedade x clima (tanto no âmbito da vulnerabilidade socioespacial quanto das medidas preventivas de saúde pública), visando maior diálogo com o poder público e com os tomadores de decisão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade do Recife é capital do estado de Pernambuco, localizada na costa oriental da Região Nordeste do Brasil (NEB). Está localizada entre as latitudes 7°54'00" S e 8°9'00" S e as longitudes 34°49'00" O e 35°03'00" O (Figura 16) e altitude média de 4 a 10 metros. Possui uma área total é de aproximadamente 218,50 km<sup>2</sup> e população de aproximadamente 1.600.000 habitantes. A sua Região Metropolitana apresenta uma população estimada de 4.054.000 hab. para o ano de 2019 (IBGE, 2018).



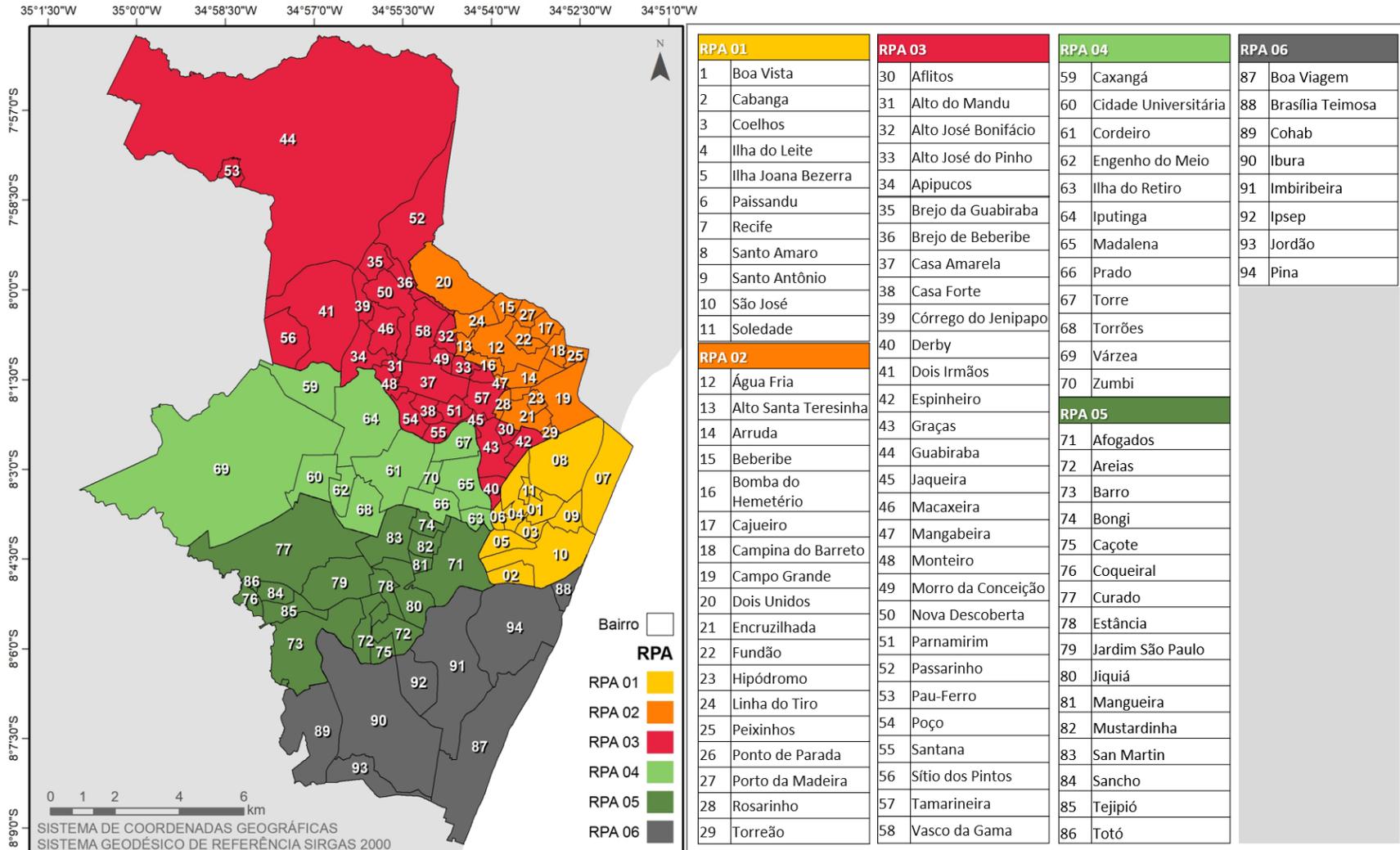
Fonte: A autora (2021). Dados provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A cidade está estabelecida predominantemente em uma planície fluviomarina, circundada por encostas e morros, ilhas e alagados. Os seus principais rios são o Beberibe, Capibaribe, Tejiipió e afluentes do Jaboatão e do Pirapama.

O tipo climático do Recife é o Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental (MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, 2007), caracterizado por chuvas de outono/inverno e baixas amplitudes de temperatura e umidade do ar, tendo um regime de precipitação anual intenso e com elevada variabilidade e direção predominante do vento de sudeste durante todo o ano.

O território é predominantemente urbano (Figura 17), composto por 94 bairros, 18 microrregiões, 6 Regiões Político Administrativas (RPA) e 1.854 setores censitários. A multiplicidade dos elementos contidos em sua malha se deve tanto aos seus atributos físicos-naturais quanto seu ao processo de ocupação urbana.

Figura 17 – Mapa do Recife apresentando os limites das Regiões Político-Administrativas (RPA) e seus respectivos bairros numerados e listados.



Fonte: A autora (2021). Dados provenientes da Prefeitura Municipal do Recife.

## 3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

### 3.2.1 Caracterização física do Espaço Urbano e suas condicionantes geoambientais

Os elementos abordados na caracterização do espaço urbano do Recife envolveram elementos naturais e artificiais relevantes na formação do clima urbano. O universo da caracterização é a **paisagem** urbana do Recife e as duas propriedades abordadas foram a cobertura e a estrutura da superfície.

A classificação do tipo de cobertura do solo foi a etapa inicial desta caracterização e indicou o tipo de **cobertura da superfície**. As três classes de cobertura do solo abordadas neste estudo foram: Corpos Hídricos (CH), Cobertura Vegetal (CV) e Superfície Edificada (SE).

A delimitação destas classes foi realizada a partir do cálculo de índices radiométricos de superfície a partir de processamento digital de imagem. As imagens utilizadas para a classificação foram provenientes do satélite Landsat-8 sensor OLI, (órbita 214/ ponto 66), referentes ao dia: 29/10/2019.

O Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água (IMDNA), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) e o Índice de Áreas Construídas por Diferença Normalizada (IADN) foram calculados para identificar respectivamente as assinaturas espectrais de vegetação, água e construção na área de estudo. As equações destes índices estão listadas abaixo, onde: G, MIR, NIR e V representam respectivamente as bandas espectrais do verde, do infravermelho médio, do infravermelho próximo e do vermelho.

$$\text{IMDNA} = \frac{G - \text{MIR}}{G + \text{MIR}} \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{IVDN} = \frac{\text{NIR} - V}{\text{NIR} + V} \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{IADN} = \frac{\text{MIR} - \text{NIR}}{\text{MIR} + \text{NIR}} \quad \text{Equação 4}$$

Os Corpos Hídricos representam os rios, os canais e as áreas alagadas identificadas na área de estudo. A Superfície Vegetal (SV) e a Superfície Edificada (SE) foram subdivididas nas seguintes classes: SV rasteira, SV arbustiva e SV arbórea

para vegetação e SE solo exposto, SE horizontal, SE média e SE vertical para edificações.

Todas as subclasses são referentes ao atributo vertical de seus elementos, e seus critérios estão listados no Quadro 5. A subclassificação foi realizada com base nos dados de superfície provenientes da subtração do Modelo Digital de Superfície (MDS) ao Modelo Digital do Terreno (MDT).

Quadro 5 – Classes e subclasses de cobertura do solo e respectivos critérios de delimitação.

| <b>Classe</b>               | <b>Critério da subclasse</b> |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1 Corpos hídricos           | –                            |
| 2 Cobertura Vegetal (CV)    | –                            |
| 2.1 CV rasteira             | Até 1,50 metros              |
| 2.2 CV arbustiva            | Entre 1,51 e 3,00 metros     |
| 2.3 CV arbórea              | Acima de 3,01 metros         |
| 3 Superfície Edificada (SE) | –                            |
| 3.1 SE solo exposto         | Até 1 metro                  |
| 3.2 SE horizontal           | De 1 a 6 metros              |
| 3.3 SE média                | De 6,1 a 20 metros           |
| 3.4 SE vertical             | Acima de 20 metros           |

Fonte: A autora (2021).

A caracterização da **estrutura da superfície** foi realizada a través do atributo vertical das subclasses listadas, assim como do cálculo do Fator de Visão do Céu (FVC). O qual é diretamente relacionados à capacidade de aprisionamento de radiação no *canyon urbano*, às alterações no fluxo do vento e conseqüentemente ao transporte de calor atmosférico.

A hipsometria foi representada pelo Modelo Digital do Terreno (MDT) gerado a partir dos dados de superfície provenientes do perfilamento a laser do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). O Modelo Digital de Superfície (MDS), utilizado nos demais cálculos, também é proveniente destes dados.

O cálculo do FVC foi realizado a partir do MDS, segundo o método de visualização de relevo apresentado por Zakšek et al. (2011) e por Moreira et al. (2021), baseado na Equação 5, sendo:  $n$  o número de direções ao redor do centro da abóbada celeste (foram utilizadas 16 direções neste cálculo);  $\gamma_i$  a elevação vertical do ângulo zenital (extraída do MDS).

$$\mathbf{FVC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \text{sen}\gamma_i}{n} \quad \text{Equação 5}$$

As classes de cobertura/estrutura da superfície foram utilizadas tanto na caracterização da área de estudo quanto como variável descritiva da modelagem espacial da ICU. As escalas espaciais utilizadas variaram a partir da resolução espacial dos arquivos raster (30 m para classes de cobertura-estrutura da superfície; 2 m para FVC), passando pela escala dos setores censitários, dos bairros e das Regiões Político-Administrativas.

Esta flexibilidade entre diversas escalas de representação foi possível devido à hierarquia existente nas delimitações entre setores censitários, bairros, RPA e município. A análise da paisagem foi baseada em SIG e teve a finalidade de quantificar e compreender os elementos da paisagem urbana que interagem com a ICU na área de estudo.

### 3.2.2 Obtenção dos dados climáticos

A compreensão do Campo Térmico da cidade do Recife foi baseada em: a) dados climáticos provenientes da estação 82900 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e b) dados de temperatura do ar ( $T_a$ ) provenientes de 8 termohigrômetros (TH) instalados ao longo da área de estudo e disponibilizados pelo Grupo de Estudos em Climatologia Tropical e Eventos Extremos (Tropoclima).

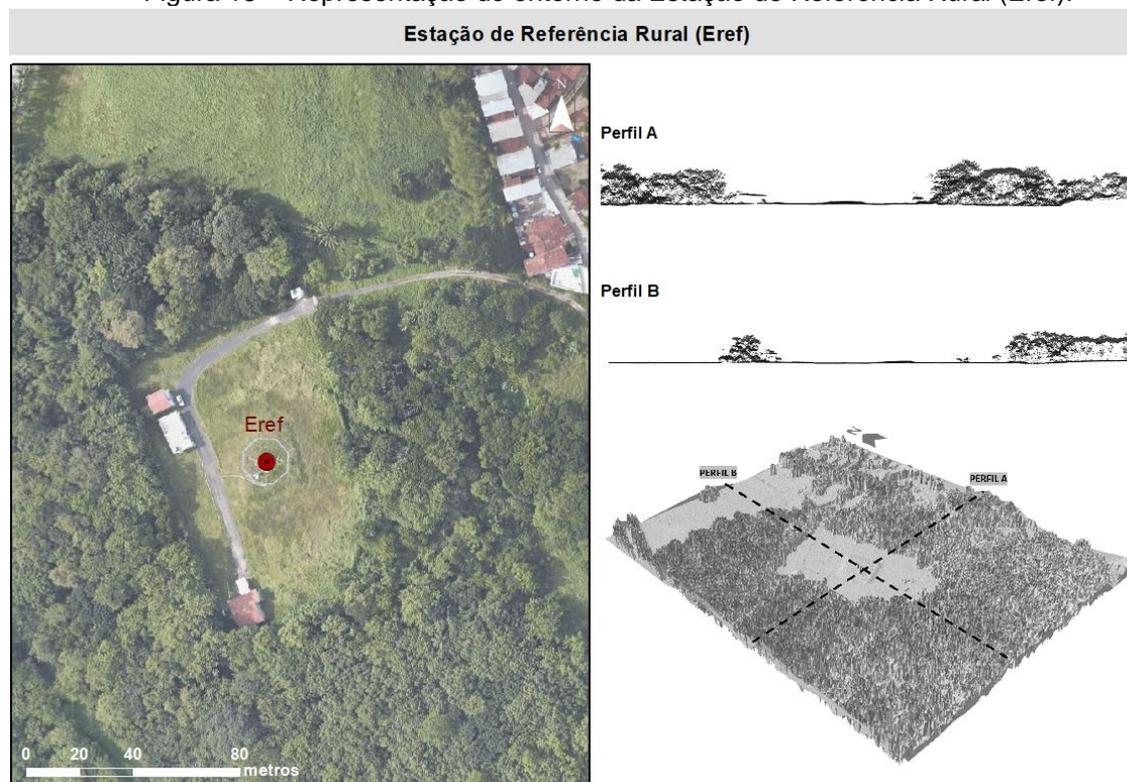
A série de dados provenientes da estação do INMET é a mais longa deste estudo e compreende o período entre 01 de janeiro de 1962 até 31 de dezembro de 2019, totalizando 57 anos de dados. Estes dados foram utilizados para apresentar as estatísticas históricas dos valores de  $T_a$  e  $U_r$  para a área de estudo e contextualizar o ano de estudo (2018).

No que tange a análise da ICU, os dados de  $T_a$  referentes ao ano de 2018 desta estação foram considerados como a Estação de Referência Rural ( $E_{ref}$ ) e os dados de precipitação foram utilizados para identificar os dias a serem excluídos da análise. A Figura 18 apresenta o entorno da  $E_{ref}$ .

Os dados dos termohigrômetros foram disponibilizados pelo Tropoclima e são provenientes de uma campanha de coleta de dados no Recife que iniciou em dezembro de 2017 e finalizou em março de 2019. O recorte temporal deste estudo

corresponde a todo o ano de 2018. A Figura 19 apresenta a localização dos sensores. Os termohigrômetros utilizados foram da marca Hobo U23-001<sup>2</sup>, fixados em abrigo à 1,50 m de altura e intervalo temporal de 30 minutos. A escolha dos locais de instalação dos termohigrômetros considerou a diversidade da paisagem circundante.

Figura 18 – Representação do entorno da Estação de Referência Rural (Eref).



Fonte: A autora (2021).

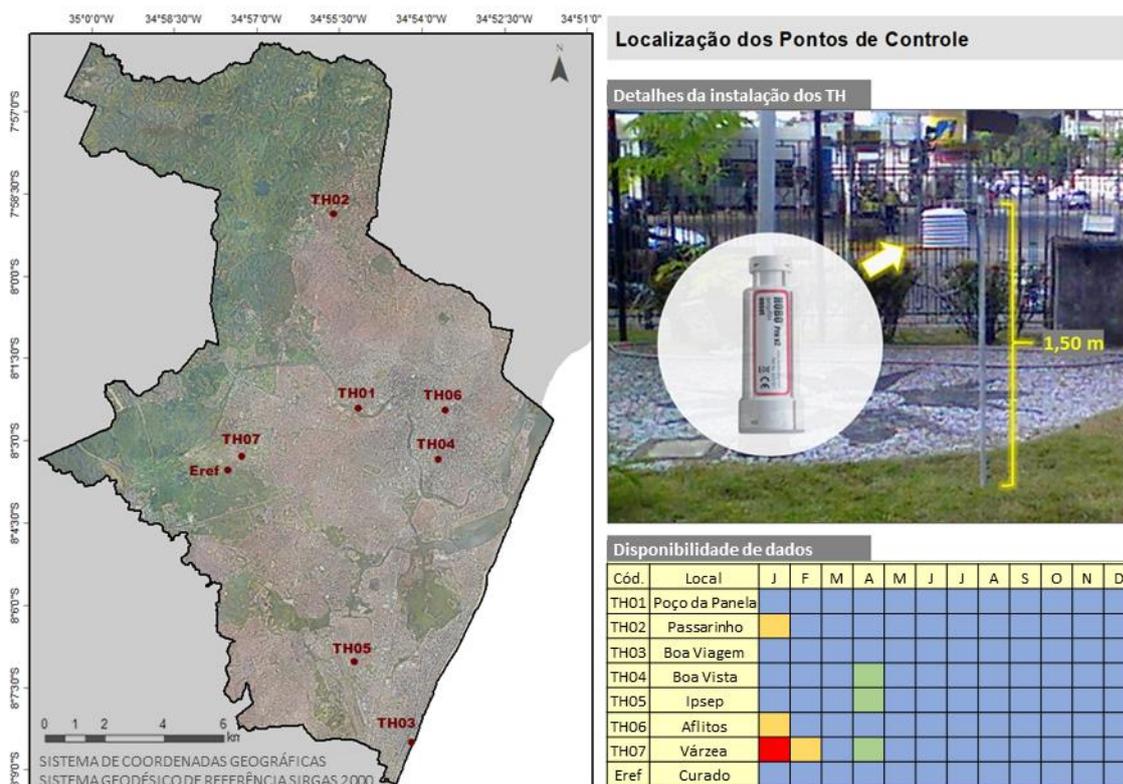
A Figura 20 ilustra a localização e a paisagem de entorno do Termohigrômetro 01 (TH01) e do Termohigrômetro 02 (TH02). O TH01 foi localizado no bairro do Poço da Panela, às margens do Rio Capibaribe, em uma área composta por casarios históricos, calçamento de pedra e pouca circulação de automóveis.

O TH02 foi localizado no bairro de Passarinho, em uma área residencial de porte horizontal e médio pertencente à Zona Especial de Interesse social (ZEIS). Este bairro também possui uma reserva de Mata Atlântica com 406 hectares.

---

<sup>2</sup> Produto: HOBO U23-001 Temp/RH; Número de Série: 10449323; Número de Versão: 1.10. Fabricante: Onset Computer Corporation.

Figura 19 – Localização dos sensores, detalhes da instalação dos termohigrômetros e tabela de disponibilidade dos dados, marcando em vermelho os meses sem nenhum registro de dados, em laranja os meses com até 15 dias de falta de dados, em verde os meses com até 3 dias de falta de dados e em azul os meses sem nenhum dia faltante.



Fonte: A autora (2021).

Figura 20 – Representação do entorno do Termohigrômetro 01 (TH01), à esquerda e do Termohigrômetro 02 (TH02) à direita.



Fonte: A autora (2021).

A Figura 21 ilustra a localização e a paisagem de entorno do Termohigrômetro 03 (TH03) e do Termohigrômetro 04 (TH04). O TH03 foi instalado na orla marítima do bairro de Boa Viagem, em uma superfície de concreto e próximo à uma avenida de intenso tráfego de veículos. Por se localizar a “barlavento” dos prédios do bairro de Boa Viagem, o TH03 também recebe influência direta do Oceano Atlântico. O TH04

foi localizado no bairro de Boa Vista, inserido no centro comercial da cidade, refletindo em sua paisagem edifícios comerciais residenciais dentre um intenso fluxo de pessoas e automóveis

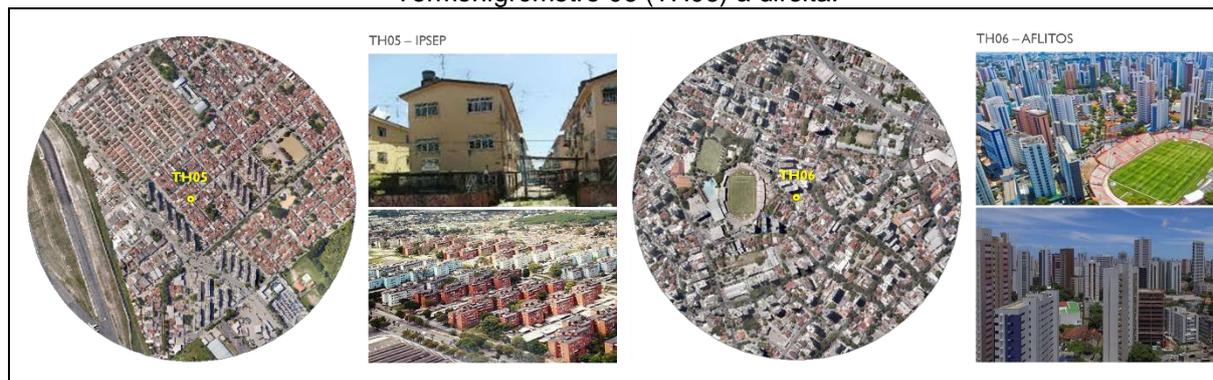
Figura 21 – Representação do entorno do Termohigrômetro 03 (TH03), à esquerda e do Termohigrômetro 04 (TH04) à direita.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 ilustra a localização e a paisagem de entorno do Termohigrômetro 05 (TH05) e do Termohigrômetro 06 (TH06). O TH05 localiza-se no Bairro do Ipsep, próximo à pista do Aeroporto Internacional dos Guararapes, circundado por um conjunto de prédios de porte médio (de 3 a 4 pavimentos). o TH06 foi localizado no bairro dos Aflitos, o qual faz parte do conjunto de bairros inclusos na “Lei dos Doze Bairros”. A paisagem circundante do TH06 é majoritariamente residencial e verticalizada.

Figura 22 – Representação do entorno do Termohigrômetro 05 (TH05), à esquerda e do Termohigrômetro 06 (TH06) à direita.



Fonte: A autora (2021).

Por fim, o Termohigrômetro 07 (TH07) foi localizado no bairro da Várzea, próximo ao Campus 1 da Universidade Federal de Pernambuco. O entorno apresenta edificações horizontais e espaçadas, espaços cobertos por vegetação herbácea, ruas largas, pavimentadas e arborizadas. Ao redor do campus universitário encontram-se áreas com edificações justapostas com até três pavimentos, localizadas em ruas estreitas e pouco ordenadas. (Figura 23).

Figura 23 – Representação do entorno do Termohigrômetro 07 (TH07).



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.3 Análise dos dados climáticos e o cálculo da ICU

A análise dos dados climáticos teve o objetivo de compreender o contexto do período de estudo na série histórica; delimitar o período seco e chuvoso; descrever as particularidades dos dados registrados pelos TH, caracterizar as ICU registradas por cada TH e identificar dias representativos de ICU intensa. Devido às características tropicais litorâneas, a sazonalidade do Recife é marcada pela concentração/dispersão

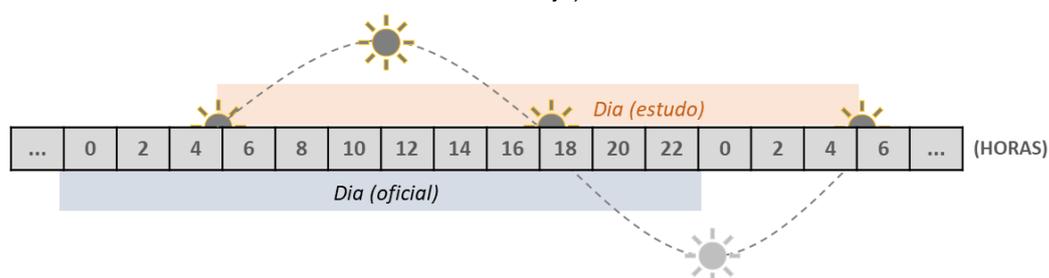
da precipitação, por este motivo, o presente estudo contrapõe na análise os valores de ICU para o período chuvoso e período seco.

Foram analisados os dados históricos (1961 – 2019) de  $T_a$ ,  $U_r$  e precipitação da  $E_{ref}$  com a finalidade de compreender o comportamento destas variáveis ao longo dos anos, contextualizar o ano de 2018 na série de dados e de delimitar os meses do período chuvoso e do período seco. Esta delimitação foi feita considerando o limiar do segundo quartil da série dos dados de precipitação. Os meses acima deste limiar foram incorporados ao período chuvoso, os demais ao seco.

Os valores absolutos, assim como as medidas de dispersão, dos dados dos TH foram analisados nas escalas temporais horária, diária, mensal, sazonal e anual. Todos os dados horários obtidos foram convertidos e representados em horário local (UTC -3). O dia da análise de ICU é representado a partir do horário do nascer do sol, pois a ICU é um fenômeno que tende a se intensificar no período noturno. A Figura 24 representa a diferença entre o intervalo diário oficial e o intervalo diário do estudo.

O horário de nascer-do-sol e pôr-do-sol nos solstícios de inverno e verão no ano de 2018 foram respectivamente às 05:31 -17:11 e 05:00 - 17:36. Estes horários não sofrem uma variação expressiva ao longo do ano na latitude do Recife, por isto o horário adotado para o início do dia de ICU foi às 5:00 durante todo o ano.

Figura 24 – Ilustração da diferença entre os intervalos de dia oficial (em azul) e de estudo (em laranja).



Fonte: A autora (2021).

Considerando que a ICU ocorre sob condições atmosféricas estáveis, foram excluídos da análise os dias que apresentaram volume pluviométrico superior a 0.2 mm. Além disto, a análise respeitou os critérios de qualidade de metodológica para observações de ICU apresentado por (STEWART, 2019) e listados no Cap. 2.2. O **cálculo da ICU** foi realizado para cada TH e correspondeu às escalas temporais citadas. A Equação 6 definiu os valores de ICU e representa a diferença entre a  $T_a$  do termohigrômetro ( $T_{a_{th}}$ ) e a  $T_a$  da  $E_{ref}$  ( $T_{a_{ref}}$ ).

$$ICU = T_{a_{th}} - T_{a_{ref}}$$

Equação 6

A intensidade da ICU foi analisada sob duas perspectivas: a geral e a local. A perspectiva geral tem a ver com a classificação de **magnitude de ICU** proposto por Fernández García (1996), o qual é amplamente adotada por diversos autores tanto para qualificar os valores de ICU quanto para comparar a ICU entre cidades distintas (descrita no Cap. 2.2). Por este motivo, o presente estudo qualifica esta classificação como “geral”, pois ela permite utilizar os parâmetros de classificação adotados por outros estudos e, assim, comparar a intensidade da ICU no Recife com as demais apresentadas na literatura nacional e internacional que também adotam esta classificação, o Quadro 6 lista as classes adotadas e seus respectivos limites.

Quadro 6 – Classificação de magnitude da ICU

| <b>Intervalo</b> | <b>Magnitude</b> |
|------------------|------------------|
| 0 ° – 2 °C       | Fraca            |
| 2 °C – 4 °C      | Moderada         |
| 4 °C – 6 °C      | Forte            |
| Acima de 6 °C    | Muito forte      |

Fonte: Adaptado de Fernández García (1996)

A perspectiva local lida com a distribuição de frequência de ICU inerente a cada TH, pois entende-se que a intensidade relativa da ICU em cada ponto pode variar de acordo com as características locais. Por exemplo: uma ICU extremamente forte em um ponto periurbano pode ser identificada como habitual em um ponto central da cidade.

Por isto, a **intensidade relativa** da ICU foi identificada para cada série a partir do cálculo dos quantis, delimitando 7 classes: extremamente forte, muito forte, forte, habitual, fraca, muito fraca e extremamente fraca. A Equação 7 representa o cálculo dos quantis utilizados e considera a probabilidade contínua (Prob) dos valores de ICU (X) para cada quantil (Qp). Os limites (p) utilizados para cada classe estão apresentados no

Quadro 7.

$$\text{Prob}(X \leq Q_p) = p$$

Equação 7

Quadro 7– Intervalos dos quantis e classes de intensidade de ICU.

| <b>Classe</b> | <b>Intervalo</b> |
|---------------|------------------|
|---------------|------------------|

|                    |                        |
|--------------------|------------------------|
| Extremamente fraca | $Q_p < 0,05$           |
| Muito fraca        | $0,05 \leq Q_p < 0,15$ |
| fraca              | $0,15 \leq Q_p < 0,25$ |
| Habitual           | $0,25 \leq Q_p < 0,50$ |
| Forte              | $0,50 \leq Q_p < 0,75$ |
| Muito forte        | $0,75 \leq Q_p < 0,95$ |
| Extremamente forte | $Q_p > 0,95$           |

Fonte: A autora (2021).

O cálculo da intensidade relativa da ICU possibilita a análise dos valores obtidos por cada TH de modo a identificar padrões de similaridade. Dentre eles, o presente estudo procurou identificar os **dias representativos** de ICU, tanto para o período chuvoso quanto seco, a partir dos dias que apresentaram a classe “extremamente forte” de intensidade relativa de ICU em todos os TH nestes períodos. Os valores horários de ICU referentes aos dias representativos foram utilizados no procedimento de modelagem espacial da ICU, apresentada no próximo capítulo.

### 3.2.4 Modelagem espacial da ICU

A espacialização da ICU a partir dos dados obtidos pelos TH foi realizada pelo procedimento de modelagem espacial multivariada (AMORIM, 2020; DUBREUIL et al., 2002; FOISSARD, 2016; GOMES et al., 2017), e baseia-se na regressão linear múltipla entre as variáveis nas janelas que apresentam o maior grau de correlação com os valores de variável dependente.

A regressão linear é definida pela Equação 8, onde Y corresponde à variável dependente (a ICU). As variáveis descritivas são aquelas que influenciam e/ou explicam a variável dependente. A relação e a força das variáveis descritivas são representadas pelo coeficiente  $\beta$ . A porção da variável dependente que não é explicada pela equação resulta no valor de  $\varepsilon$ .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad \text{Equação 8}$$

A Equação 8 mostra que para cada variável dependente há um conjunto de variáveis descritivas a serem calculadas. Pela natureza do Clima Urbano,

independente da escala tratada, as superfícies, os materiais e demais características do espaço urbano interferem no balanço de energia, massa e movimento (ANDRADE, 2005). No caso da ICU, são diversas as variáveis apontadas pela literatura (STEWART & OKE, 2012; OKE, 1981, AMORIM, 2019).

Apesar da grande quantidade de variáveis descritivas, quantificar o grau de influência das mesmas sobre a área de estudo permite identificar aquelas mais relevantes a serem aplicadas no universo limitado de variáveis do modelo. Dentre as classes e subclasses de cobertura do solo listadas no Quadro 5 (Cap. 3.2.1), as variáveis independentes utilizadas estão expostas no Quadro 8 enquanto os valores horários de ICU nos dias representativos representam as variáveis dependentes.

Quadro 8 – Variáveis independentes do modelo.

| Variável          | Classes                                   |
|-------------------|---|
| 1 Corpos hídricos | Corpos hídricos                           |
| 2 Vegetação       | União de todas as subclasses de vegetação |
| 3 Urbano 1        | Subclasse SE solo exposto                 |
| 4 Urbano 2        | Subclasse SE horizontal                   |
| 5 Urbano 3        | União das classes SE média e SE vertical  |

Fonte: A autora (2021).

A partir deste cálculo é possível selecionar e definir tanto a correlação quanto o melhor raio de influência de cada variável descritiva. Para cada TH o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 9) foi calculado entre a variável dependente e as variáveis descritivas em seis raios de influência (janelas móveis). (LANG; BLASCHKE, 2009).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Equação 9}$$

O processamento foi realizado em ambiente SIG. As variáveis de entrada do modelo foram representadas em camadas no formato *raster* com resolução espacial 30 metros. A construção das camadas respeitou o melhor raio de abrangência de cada variável, listadas na Tabela 1, definido pelas janelas móveis. Portanto, cada célula dos *rasters* representa a fração da cobertura da variável correspondente dentro do raio determinado ao redor da célula.

Tabela 1 – Janelas móveis utilizadas e respectivos raios de abrangência.

| Janela | Raio       |
|--------|------------|
| 3x3    | 90 metros  |
| 5x5    | 150 metros |
| 7x7    | 210 metros |
| 9x9    | 270 metros |
| 13x13  | 390 metros |
| 17x17  | 510 metros |

Fonte: A autora (2021).

Este procedimento foi realizado para os dias representativos do período seco e do período chuvoso. Para observar a estimativa da evolução horária da ICU, este procedimento foi realizado nos seguintes horários: 09, 12, 15, 18, 21, 0, 3 e 5 horas.

Além disto, foi examinado dos dados observados dos dias representativos o horário que registrou a maior intensidade de ICU no conjunto de dados, este horário correspondeu à ICU máxima ( $ICU_{máx}$ ) do dia representativo, o qual também passou pela modelagem espacial. Os dados resultantes da  $ICU_{máx}$  foram importantes tanto na discussão sobre a ICU resultante da paisagem urbana do Recife (Cap. 4.4) quanto como dado de entrada no cálculo dos índices de vulnerabilidade, descritos no próximo capítulo.

### 3.2.5 Análises de vulnerabilidade socioespacial à ICU

A análise da vulnerabilidade foi realizada no contexto da vulnerabilidade socioespacial (Cap. 2.2), a qual abrange tanto a dimensão física quanto social do domínio espacial. Para isto, as três componentes da vulnerabilidade foram abordadas (Figura 25) no desenvolvimento do Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à ICU (IVSI), proposto pelo presente estudo.

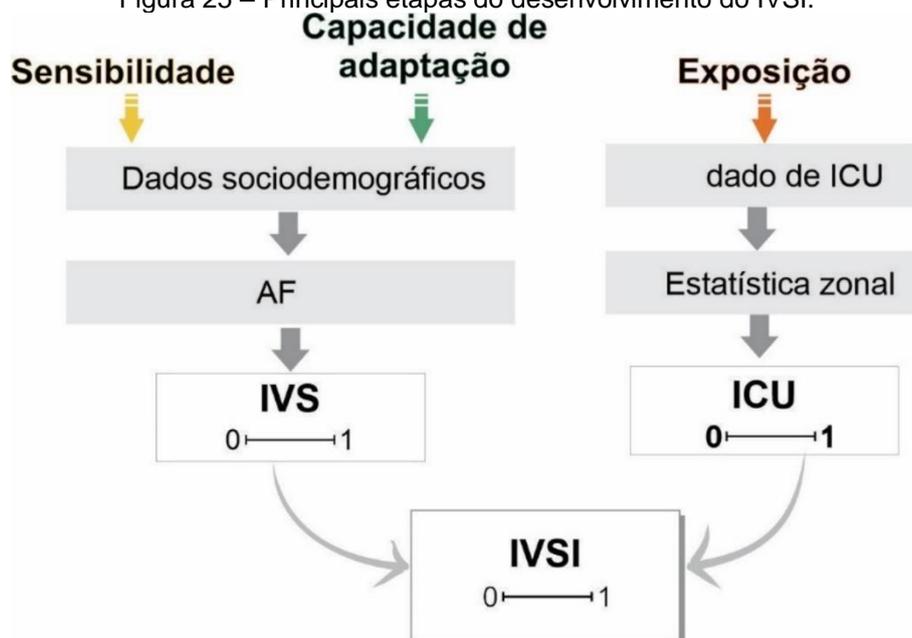
Ressalta-se que o procedimento de cálculo do IVSI está sendo desenvolvido e proposto pelo presente estudo e se baseia nos estudos prévios realizados por (ALMEIDA, 2010; COSEO e LARSEN, 2014; DUTRA JR., 2016; JOHNSON e WILSON, 2009; NIU *et al.*, 2021).

A análise das componentes sensibilidade e capacidade de adaptação foi baseada nos dados do censo demográfico (IBGE, 2010) no nível do setor censitário. A informação destas duas componentes foi sintetizada no Índice de Vulnerabilidade Social (IVS). Foram selecionadas inicialmente 25 variáveis relativas a 1.854 setores

censitários: 14 representando a sensibilidade e 11 a capacidade de adaptação, conforme listadas pelos Quadro 9 e Quadro 10 respectivamente.

A Análise Fatorial (AF) por meio da Análise de Componentes Principais (ACP), com rotação varimax, foi utilizada para reduzir a quantidade inicial de variáveis para poucas componentes/fatores, de modo a reduzir redundâncias e multicolinearidades entre elas.

Figura 25 – Principais etapas do desenvolvimento do IVSI.



Fonte: A autora (2021)

Quadro 9 – Lista das variáveis demográficas iniciais consideradas no Grupo 1 (criticidade).

| <b>Variáveis demográficas iniciais (sensibilidade)</b>  |
|---|
| 1 - Crianças responsáveis por domicílios particulares permanentes   |
| 2 - Crianças não alfabetizadas  |
| 3 - Crianças  |
| 4 - Responsáveis por domicílios particulares permanentes com rendimento nominal mensal de até 3 salários-mínimos. |
| 5 - Responsáveis por domicílios particulares permanentes sem rendimento nominal mensal.                           |
| 6 - Responsáveis por domicílios particulares permanentes não alfabetizados.                                       |
| 7 - Idosos responsáveis por domicílios particulares permanentes   |
| 8 - Idosos responsáveis por domicílios particulares permanentes não alfabetizados                                 |
| 9 - Idosos  |
| 10 - Idosos não alfabetizados   |
| 11 - Mulheres responsáveis por domicílios particulares permanentes com 10 a 19 anos de idade.                     |
| 12 - Mulheres responsáveis por domicílios particulares permanentes com mais de 60 anos de idade.                  |
| 13 - Mulheres não alfabetizadas responsáveis por domicílios particulares permanentes.                             |
| 14 - Pobreza extrema  |

Fonte: A autora (2021).

Quadro 10 – Lista das variáveis demográficas iniciais consideradas no Grupo 2 (capacidade de suporte).

| <b>Variáveis demográficas iniciais (capacidade de adaptação)</b>   |
|--|
| 1 - Densidade Demográfica  |
| 2 - Domicílios sem arborização   |
| 3 - Domicílios sem abastecimento de água da rede geral.  |
| 4 - Domicílios particulares permanentes com lixo não coletado  |
| 5 - Domicílios particulares permanentes precários  |
| 6 - Domicílios particulares permanentes com banheiro ou sanitário sem esgotamento sanitário via rede geral de esgoto, pluvial ou fossa séptica |
| 7 - Domicílios particulares permanentes sem pavimentação, sem calçada e sem meio-fio/guia  |
| 8 - Domicílios particulares permanentes sem iluminação pública   |
| 9 - Domicílios particulares permanentes com esgoto a céu aberto  |
| 10 - Domicílios particulares permanentes com lixo acumulado nos logradouros  |

Fonte: A autora (2021).

Estas variáveis foram organizadas na escala do setor censitário. Seus valores foram normalizados e, posteriormente, submetidas à Análise Fatorial (AF) baseada em Análise de Componentes Principais (ACP) com rotação varimax. Este procedimento tem a finalidade de eliminar inconsistências e delimitar os fatores e as variáveis mais representativas do conjunto de dados (ALMEIDA, 2010; DUTRA JR., 2016).

Em seguida, os fatores cuja variância acumulada alcança pelo menos 65%, são considerados para a construção do índice. Os testes de significância também foram aplicados: Bartlett menor que 0.5 e medida Kaiser Meyer-Olkin superior a 0.7. Para cada fator são selecionadas as variáveis que apresentam carga (negativa ou positiva) acima do percentil 0,8 do conjunto de variáveis do fator. Os fatores são nomeados de acordo com o conjunto de variáveis retidas.

O valor final de cada fator ( $F$ ), por setor censitário, é resultante da média ponderada de suas variáveis multiplicada à carga do fator, como mostra a Equação 10. Para obter o valor final do IVS de cada setor censitário, os fatores são submetidos à média ponderada com as suas respectivas cargas (Equação 11) e, em seguida, é calculado o z-score dos resultados (Equação 12). Nas equações a seguir  $q$  corresponde à carga do fator ( $F$ ),  $x_n$  às variáveis selecionadas do fator;  $p$  aos pesos das variáveis.

$$F = q * \frac{(x_1 * p_1) + (x_2 * p_2) + \dots (x_n * p_n)}{p_1 + p_2 + \dots p_n} \quad \text{Equação 10}$$

$$IVS' = \frac{(F_1 * q_1) + (F_2 * q_2) + \dots (F_n q_n)}{q_1 + q_2 + \dots q_n} \quad \text{Equação 11}$$

$$IVS = \frac{IVS'_{\text{setor censitário}} - IVS'_{\text{mínimo}}}{IVS'_{\text{máximo}} - IVS'_{\text{mínimo}}} \quad \text{Equação 12}$$

A componente exposição foi baseado nas resultantes da etapa da modelagem espacial da ICU, descrita no capítulo anterior. Foi calculada a média dos rasters de  $ICU_{\text{máx}}$  gerados tanto para o período seco quanto chuvoso e, em seguida, foram calculados para cada setor censitário pela média zonal.

Por fim, o IVSI corresponde à média aritmética entre os valores de SVI e de exposição. Todos os valores resultantes foram normalizados de 0 a 1 pelo mesmo processo de cálculo de z-score, apresentada na Equação 13.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{Equação 13}$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

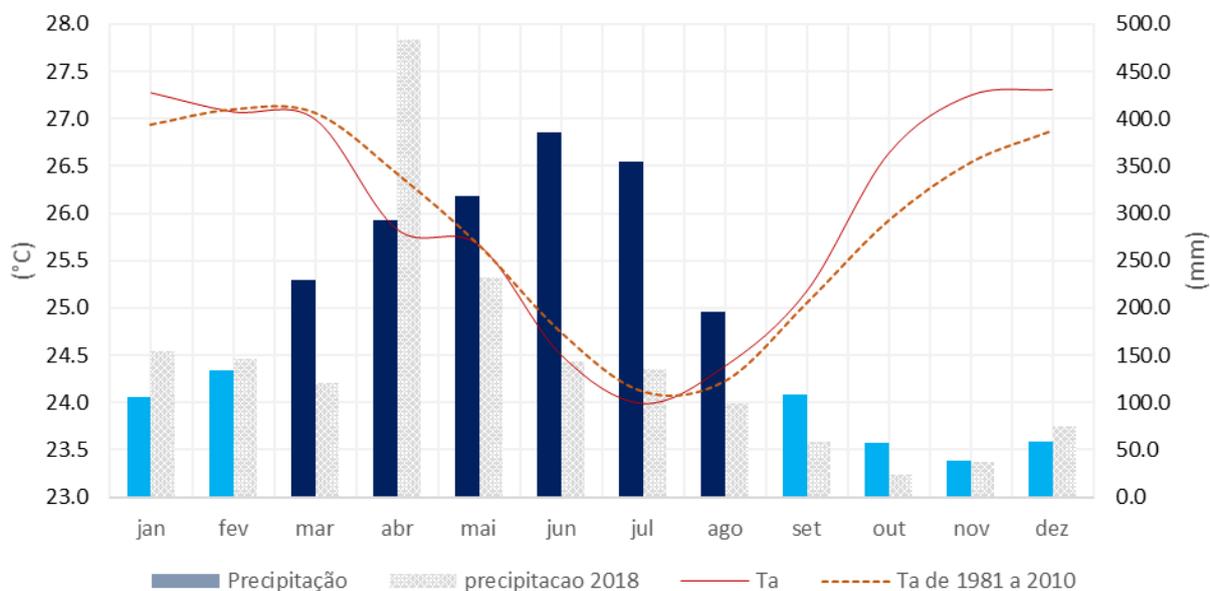
### 4.1 RESULTANTES DOS DADOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS

Os subcapítulos a seguir estão organizados de forma a descrever os dados atmosféricos obtidos e o comportamento pontual da ICU em cada Termohigrômetro (TH). Desta forma, as principais características da Estação de Referência Rural ( $E_{ref}$ ), o comportamento temporal (sazonal, mensal e horário) da ICU por TH estão apresentadas.

#### 4.1.1 Características gerais da $E_{ref}$ e dos TH no período de estudo

Os dados de precipitação registrados pela  $E_{ref}$  foram necessários tanto para a delimitação dos meses chuvosos e secos quanto para selecionar os dias a serem considerados na análise de ICU, a qual considerou apenas os dias que não apresentaram registros de precipitação. As barras em azul do Gráfico 2 apresentam os acumulados médios mensais de precipitação no Recife entre os anos de 1981 e 2010.

Gráfico 2 – Médias mensais de precipitação acumulada entre 1981 e 2010 (barras azuis); os meses do período chuvoso (barras em azul escuro) e do período seco (barras em azul claro); médias mensais de  $T_a$  para o ano de 2018 (linha contínua) e curva de  $T_a$  referente à normal climatológica



Fonte: A autora (2021). Dados provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia.

Os meses que apresentaram médias pluviométricas acumuladas acima do limiar de 165.3 mm (segundo quartil da série de dados) estão representados em azul escuro e compõem o grupo do período chuvoso. Os meses em azul claro pertencem ao grupo do período seco. Esta classificação, utilizando o segundo quartil como limiar, foi escolhida no presente estudo, mas outras classificações também são abordadas por outros autores no Recife. Por exemplo, Guedes (2020) considerou os meses de maio a julho e Medeiros (2020) os meses de abril a julho como períodos chuvosos no Recife.

Para o ano de 2018, o presente estudo registrou 158 dias com precipitação superior a 2 mm, dos quais 54 foram referentes ao período chuvoso e 104 ao período seco. Totalizando 158 dias selecionados para a análise de ICU. Quanto a distribuição de frequência dos dados de precipitação, Wanderley et al (2018) destacam que a cidade do Recife está inserida em um contexto tropical úmido, com chuvas concentradas no outono e inverno, média pluviométrica anual de 2,292 mm e uma elevada variabilidade anual de precipitação.

Estes autores também mostram que embora todos os anos apresentem probabilidade de ocorrência de eventos pluviométricos intensos no Recife, o período entre os meses de março e agosto, o qual coincide com o período chuvoso delimitado no presente estudo, apresenta uma maior probabilidade de recorrência destes eventos.

A curva contínua em laranja (Gráfico 2 e Gráfico 3) informa os valores médios mensais de temperatura do ar ( $T_a$ ) durante o ano de 2018. Os meses de outubro a março apresentaram  $T_a$  mais elevadas, enquanto os meses entre junho e agosto apresentaram  $T_a$  mais amenas.

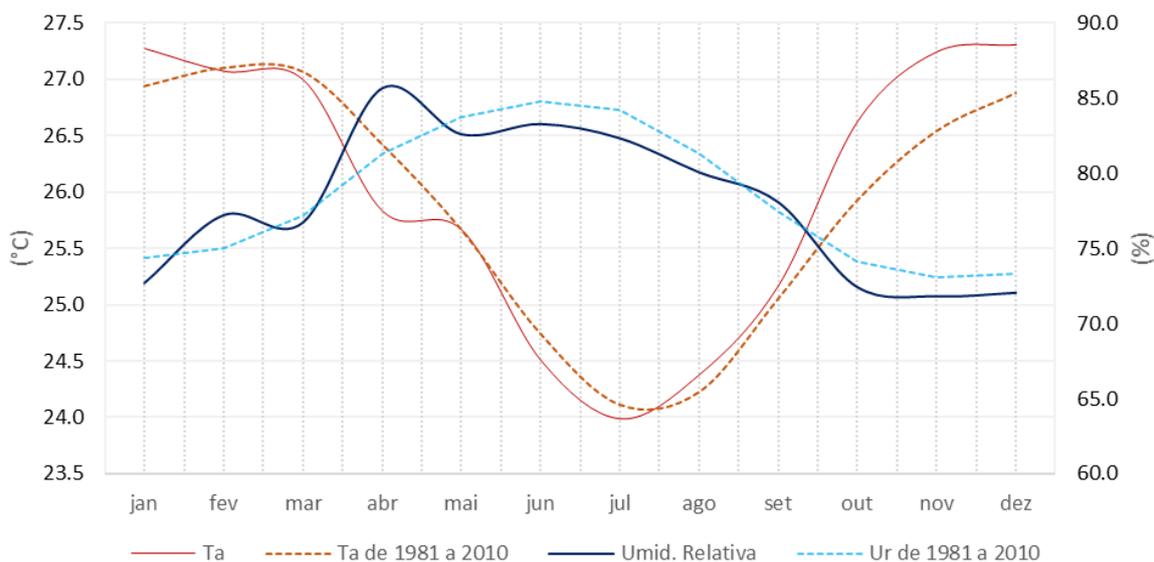
Em relação à normal climatológica (linha tracejada em laranja), o ano de 2018 apresentou maior contraste sazonal, com  $T_a$  mais elevada no período seco e mais amena no período chuvoso, principalmente no mês de abril. O mês de abril de 2018 se destacou pelo volume pluviométrico acumulado (484 mm) acima do esperado. Este excesso pluviométrico refletiu nos desvios das curvas de umidade relativa ( $U_r$ ) e de  $T_a$  neste mês (Gráfico 3).

O Gráfico 4 expõe os valores médios de  $T_a$  na escala diária e mensal para o ano de 2018. Com exceção do mês de março, o período chuvoso apresentou os menores valores horários de  $T_a$ , com destaque para o mês de julho. Os valores de  $T_a$  foram mais intensos entre as 8h às 16h, com pico às 12h. A partir das 17h a

intensidade da  $T_a$  diminui progressivamente até se apresentar mais amena durante a madrugada, com mínima às 5h.

A variação da  $T_a$  média no horário de pico (12 h) atingiu o valor máximo no mês de março (31,5 °C) e o seu mínimo no mês de julho (27,5 °C); enquanto às 5 h a  $T_a$  média variou entre 24,4 °C no mês de novembro e 20,8 °C nos meses de julho e agosto.

Gráfico 3—médias mensais de  $T_a$  (linha vermelha contínua), de Ur (linha contínua em azul) para o ano de 2018 e normal climatológica de  $T_a$  (linha tracejada em laranja) e de Ur (linha tracejada em azul).

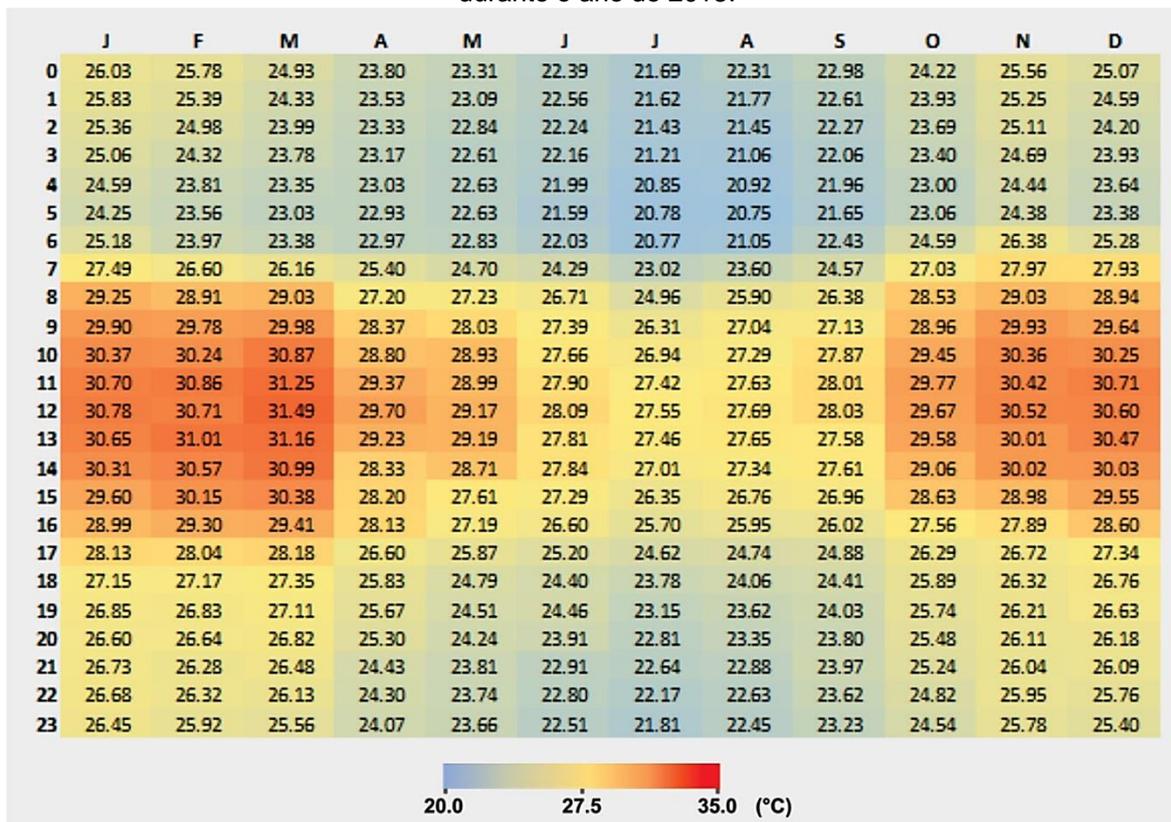


Fonte: A autora (2021). Dados provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia.

O Gráfico 5 apresenta as médias mensais de  $T_a$  registradas pelos TH e pela  $E_{ref}$  em 2018. Após estes valores serem submetidos à Análise de Agrupamento (AA) hierárquico, os pontos foram agrupados em dois grupos, simbolizados no Gráfico 5 pelas cores azul e vermelho.

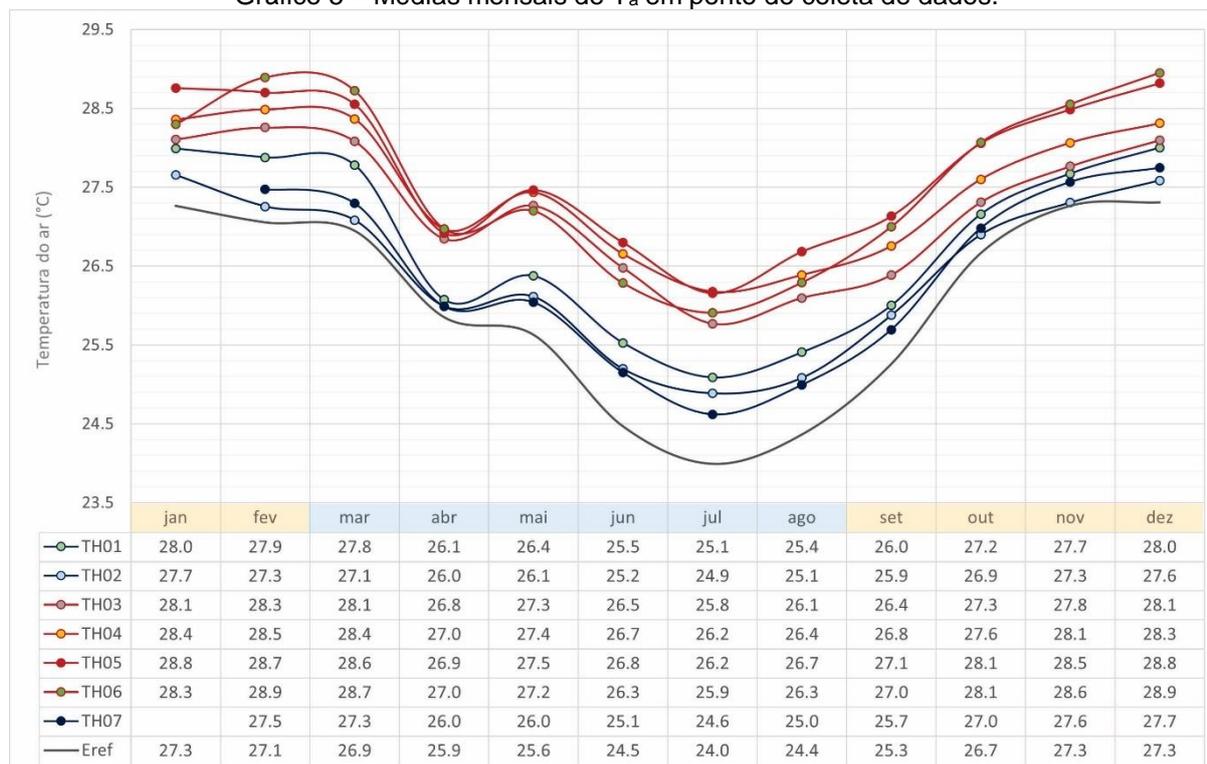
O grupo em azul representa os pontos que apresentaram as médias mensais de  $T_a$  mais amenas:  $E_{ref}$ , TH01, TH02 e TH07. Os demais, representados em vermelho, correspondem aos TH que apresentaram as maiores médias mensais de  $T_a$ . Estes TH estão localizados em pontos mais urbanizados e apresentam médias mensais de temperatura mais intensas em relação a  $E_{ref}$ .

Gráfico 4 – Médias mensais horárias da Ta registrada pela Estação de Referência Rural (Eref) durante o ano de 2018.



Fonte: A autora (2021). Dados provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia.

Gráfico 5 – Médias mensais de  $T_a$  em ponto de coleta de dados.



Fonte: A autora (2021).

O final do período seco, coincidente com o final da estação do verão, representa os meses mais quentes: dezembro, janeiro, fevereiro. Nestes meses a amplitude térmica média é de 1,9 °C. Em todos os pontos, o mês de julho apresentou os menores valores de  $T_a$  e amplitude térmica de 2,3 °C.

Estes valores mostram maior amplitude térmica no período chuvoso. O gráfico mostra também que neste período há uma maior distância entre os dois grupos de ponto: os TH localizados em pontos mais quentes (em vermelho) alcançam uma menor taxa de resfriamento.

#### **4.1.2 Dados resultantes de ICU no TH01**

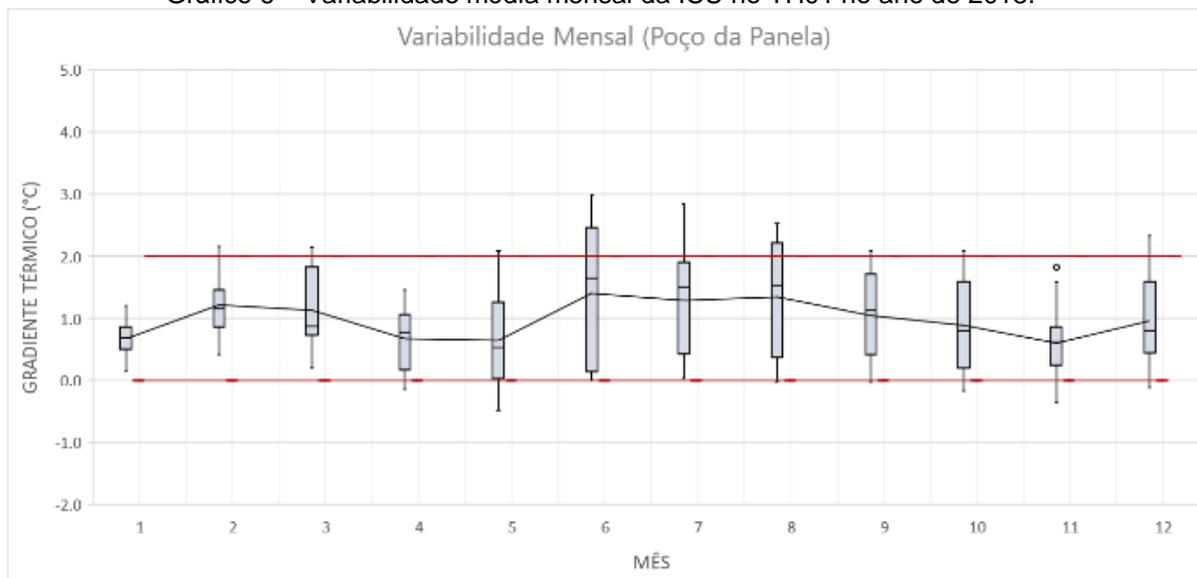
O período chuvoso no TH01, localizado no bairro do Poço da Panela, apresentou os menores valores de  $T_a$  e amplitude térmica de 5,8 °C. Na escala diária, os valores de  $T_a$  foram mais intensos a partir das 9h às 15h. com pico às 12h. A partir das 16h a intensidade da  $T_a$  diminuiu progressivamente até se apresentar mais amena durante a madrugada, sobretudo às 5h. O período seco neste ponto apresentou  $T_a$  mais elevada, com amplitude térmica de 5,3 °C ao longo dos meses. Os meses mais quentes no TH01 durante o período do estudo foram janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro.

O Gráfico 6 apresenta o diagrama de caixa da variabilidade média mensal de ICU no TH01. As linhas internas das caixas indicam a mediana enquanto a curva entre as caixas apresentam a média dos valores de ICU. O TH01 apresentou 6 meses com valores médios acima de 1°C, dos quais 4 meses foram do período chuvoso (março, junho, julho e agosto) e 2 meses do período seco (setembro e fevereiro). Nenhum mês apresentou variabilidade média de ICU acima de 2°C nem médias negativas.

Os limites superiores e inferiores das caixas indicam a variabilidade dos dados entre os percentis de 5% e 95%. Os valores fora deste intervalo são compreendidos como outliers e representados pelo símbolo de ponto. O mês de novembro foi o único a apresentar outliers de valores de médio mensal de ICU no TH01. O interior das caixas, intervalo compreendido entre os percentis de 25% e 75%, indicam a variabilidade de 50% dos valores de ICU, o TH01 apresentou maior variabilidade de ICU no período chuvoso, com destaque para os meses de junho, julho e agosto; enquanto o mês de dezembro se destacou com a menor variabilidade de ICU neste

ponto. As variabilidades horárias da ICU no TH01 para os períodos seco e chuvoso estão apresentadas pelos Gráfico 7 e Gráfico 8.

Gráfico 6 – Variabilidade média mensal da ICU no TH01 no ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

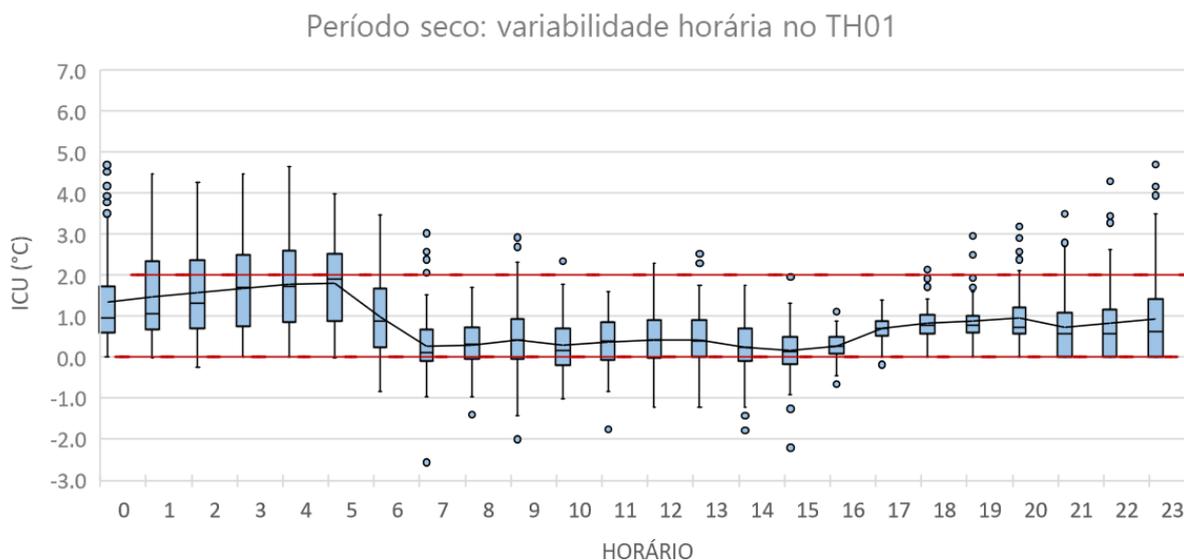
Durante todos os horários, a ICU média no TH01 se apresentou com valores positivos e maior intensidade e variabilidade no período noturno (entre 18h e 06h). Os horários noturnos tiveram ICU mais intensas no TH01 para ambos os períodos, chegando a ultrapassar 5 °C na madrugada do período chuvoso.

O Gráfico 7 e Gráfico 8 não indicam um forte contraste de ICU entre os meses secos e chuvosos no TH01, porém a ICU neste ponto se apresentou um pouco mais intensa no período chuvoso e mais variável no período seco.

A magnitude geral da ICU no TH01, tanto na escala diária quanto mensal, é majoritariamente fraca (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1996), apresentando a maior frequência dos valores entre 0 °C e 2 °C. A intensidade relativa diária da ICU no TH01 Foi calculada pelo método estatístico dos percentis.

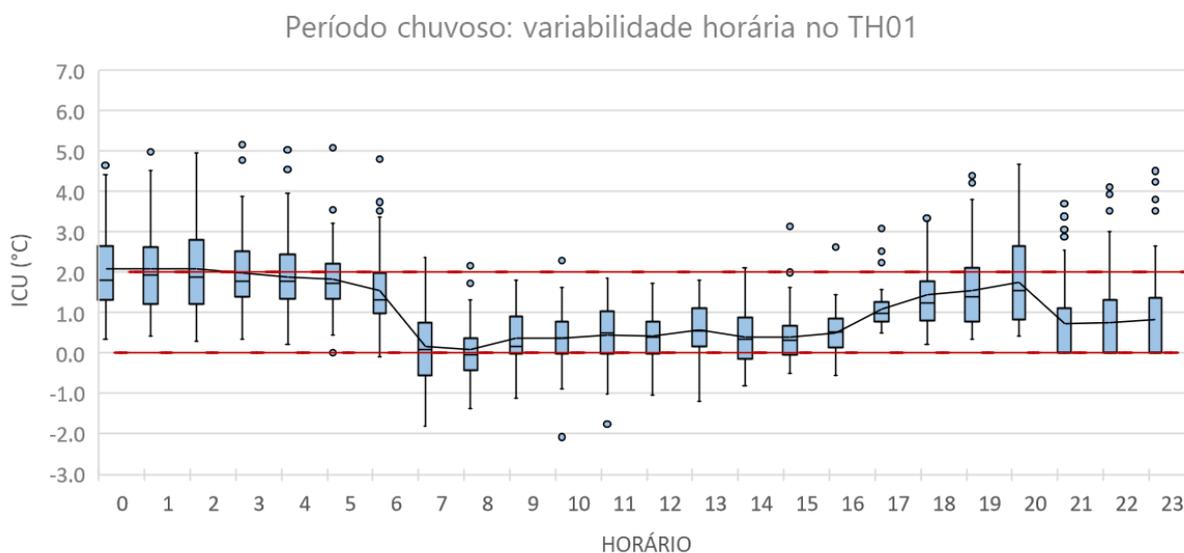
A Tabela 2 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU no TH01, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos.

Gráfico 7 – Variabilidade e horária da ICU no TH01 para o período seco do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 8 – Variabilidade e horária da ICU no TH01 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

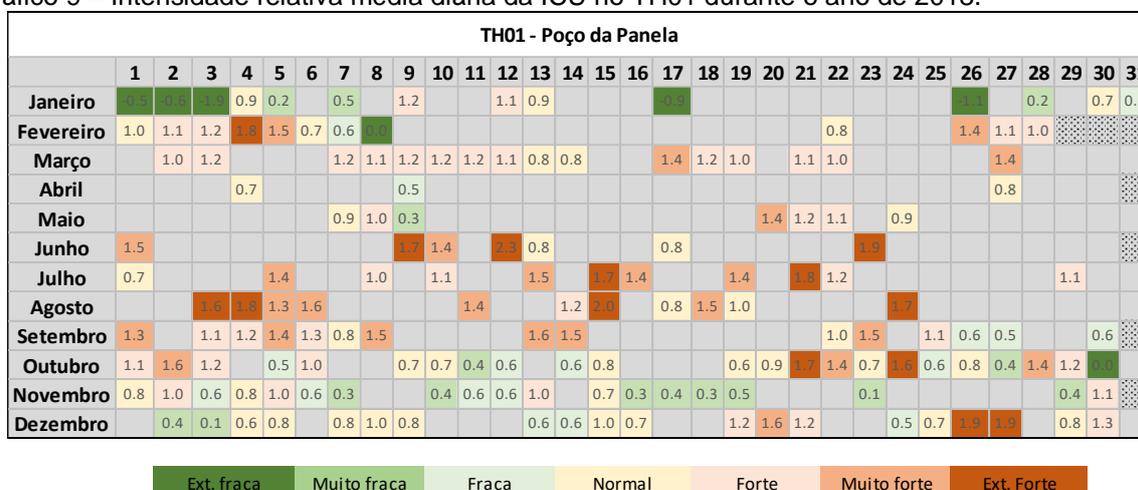
O Gráfico 9 apresenta a intensidade média diária da ICU no TH01 durante o ano de 2018. O período seco no TH01 apresentou maior quantidade de dias de ICU com magnitude relativa acima do normal (81 dias) em comparação ao período chuvoso (28 dias). O período chuvoso apresentou maior concentração de intensidade relativa extremamente forte, principalmente entre os meses de junho e agosto. Porém, todos os limiares de classes de intensidade relativa calculados para a TH01 estão abaixo do limiar de magnitude fraca segundo a classificação de Fernández García (1996). Portanto, o TH01 apresentou ICU de fraca magnitude; mais intensas em dois períodos: de fevereiro a março e de junho a agosto; e predominantemente noturna.

Tabela 2 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade relativa de ICU para o TH01, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| PERCENTIL         |             | PERÍODO SECO    |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo         | Classe      | Intervalo (°C)  | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| Qp > 0,95         | Ext. forte  | X > 1.60        | 14        | X > 1.75        | 5         |
| 0.75 < Q p ≤ 0.95 | Muito forte | 1,29 < x ≤ 1.60 | 25        | 1.51 < x ≤ 1.75 | 8         |
| 0.50 < Q p ≤ 0.75 | Forte       | 0.98 < x ≤ 1,29 | 42        | 1.26 < x ≤ 1.51 | 14        |
| 0.25 < Qp ≤ 0.50  | Normal      | 0.63 < x ≤ 0.98 | 38        | 0.91 < x ≤ 1.26 | 14        |
| 0.15 < Qp ≤ 0.25  | Fraca       | 0.47 < x ≤ 0.63 | 15        | 0.78 < x ≤ 0.91 | 5         |
| 0,05 < Q p ≤ 0,15 | Muito fraca | 0.11 < x ≤ 0.47 | 16        | 0.54 < x ≤ 0.78 | 6         |
| Qp ≤ 0,05         | Ext. fraca  | x ≤ 0.11        | 8         | x ≤ 0.54        | 2         |

Fonte: A autora (2021)

Gráfico 9 – Intensidade relativa média diária da ICU no TH01 durante o ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

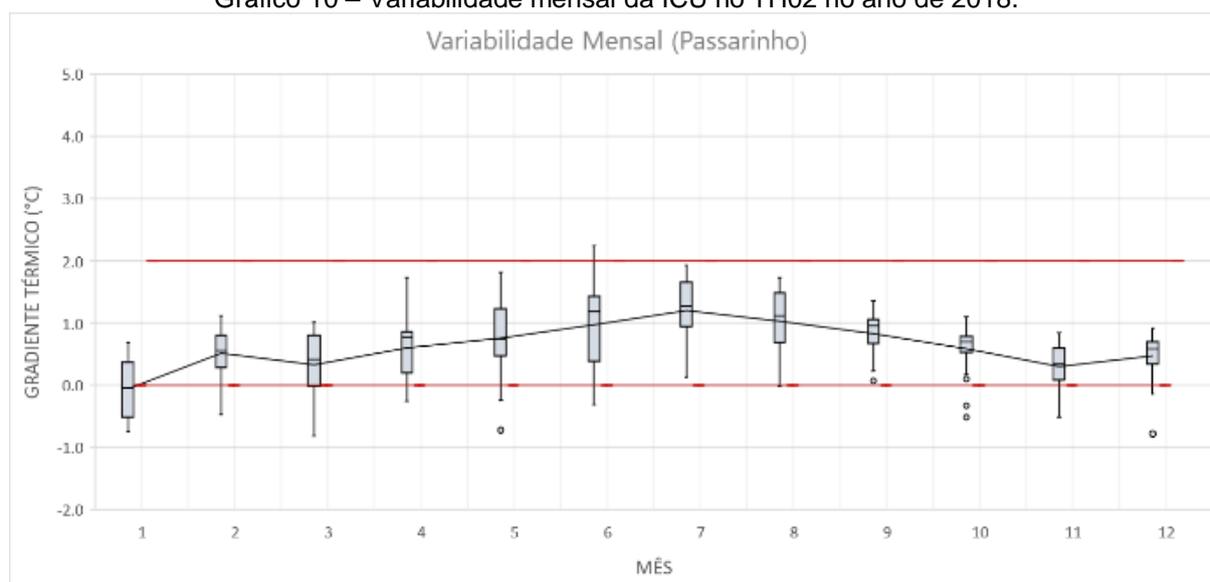
#### 4.1.3 Dados resultantes de ICU no TH02

O período chuvoso e o início do período seco no TH02, localizado no bairro de Passarinho, apresentaram os menores valores de Ta principalmente entre os meses de julho e setembro; com amplitude térmica de 6,2 °C no período chuvoso.

Na escala diária, os valores de Ta foram mais intensos entre as 9h às 16h, com pico às 13h. A partir do pôr do sol a intensidade da Ta diminuiu progressivamente até se apresentar mais amena durante a madrugada, sobretudo às 5h. O período seco apresentou Ta mais elevadas, com amplitude térmica de 6,8 °C ao longo dos meses. Os meses mais quentes no período do estudo foram janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

O Gráfico 10 apresenta o gráfico de caixa da variabilidade mensal de ICU no TH02 enquanto o Gráfico 11 e o Gráfico 12 mostram a variabilidade horária para os períodos seco e chuvoso respectivamente. Este ponto apresentou 3 meses (junho, julho e agosto) com valores médios acima de 1°C, todos pertencentes ao período chuvoso. Nenhum mês apresentou ICU média acima de 2°C nem médias negativas, porém os meses de maio, outubro e dezembro apresentaram outliers negativos de valores médios de ICU.

Gráfico 10 – Variabilidade mensal da ICU no TH02 no ano de 2018.

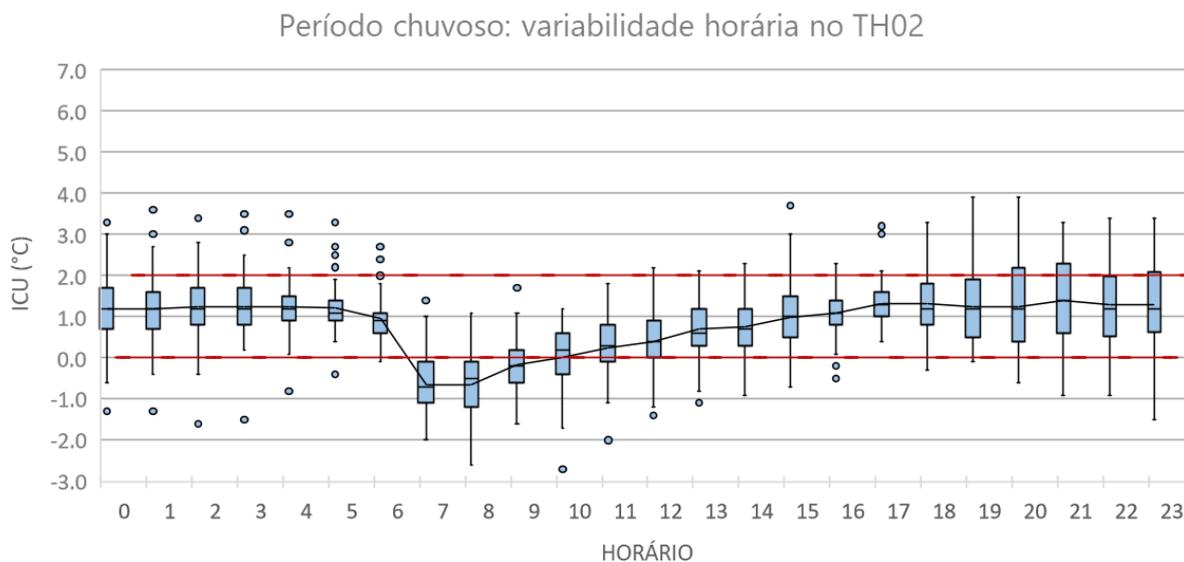


Fonte: A autora (2021)

Quanto ao intervalo entre os percentis de 25% e 75%, o TH02 apresentou maior variabilidade de ICU no período chuvoso, com destaque para o mês de junho; os meses de outubro e dezembro se destacaram com a menor variabilidade de ICU neste ponto.

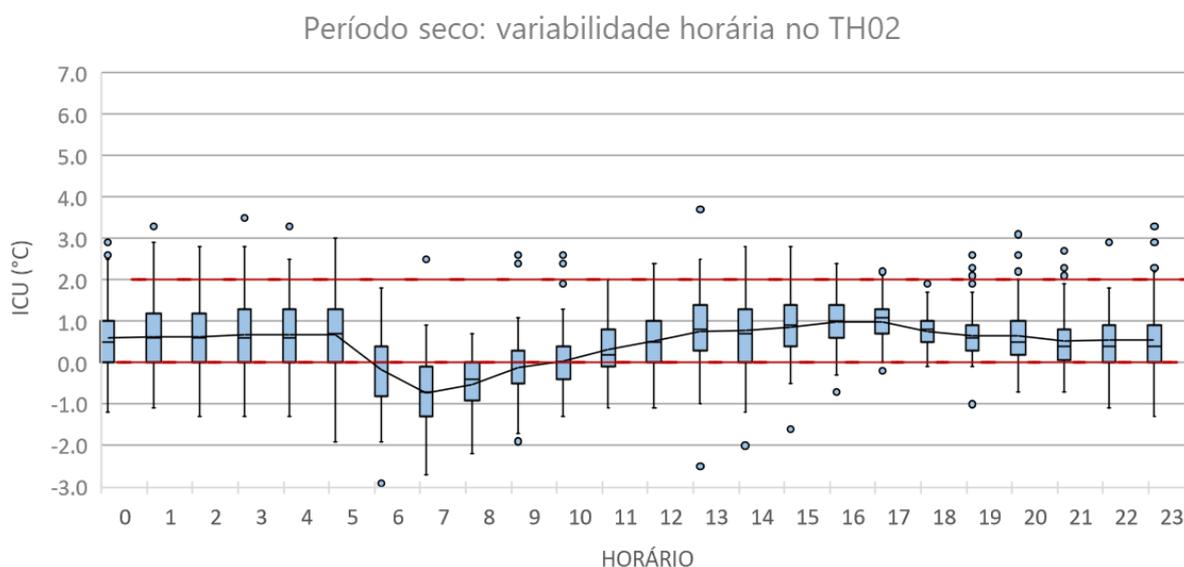
O Gráfico 11 e o Gráfico 12 mostram uma configuração de ICU que enfraquece logo após o amanhecer (após 5h) nos dois períodos, porém chegando a apresentar médias negativas às 7h e 8h durante o período seco. Indicando um aquecimento mais tardio da atmosfera do entorno em relação à Eref.

Gráfico 11 – Variabilidade e horária da ICU no TH02 para o período seco do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 12 – Variabilidade e horária da ICU no TH02 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

A partir das 9h a ICU começa a se intensificar no TH02, apresentando comportamento crescente ao longo do dia. No período seco as médias horárias de ICU não ultrapassam 1 °C e se intensificam nos horários noturnos (período chuvoso)

e vespertinos/noturnos (período seco). Apesar dos valores médios horários permearem  $\pm 1$  °C, os extremos máximos ultrapassam 3 °C na maioria dos horários do período noturno e os mínimos  $-2$  °C no período diurno. O Gráfico 11 e o Gráfico 12 indicam um contraste dos valores de ICU entre os meses secos e chuvosos, apresentando maior intensidade e variabilidade no período chuvoso.

A magnitude geral da ICU no TH02, tanto na escala diária quanto mensal, é majoritariamente fraca, apresentando a maior frequência dos valores entre 0 °C e 2 °C. A Tabela 3 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade relativa de ICU no TH02, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos.

O Gráfico 13 apresenta a intensidade média diária da ICU no TH02 durante o ano de 2018. O período seco no TH02 apresentou maior quantidade de dias de ICU acima do normal (74 dias) em comparação ao período chuvoso (28 dias). O período chuvoso apresentou maior concentração de magnitude relativa extremamente forte, apesar de que esta classe de magnitude ocorreu em todos os meses.

Porém, todos os limiares de classes de magnitude relativa calculados para a TH02 estão abaixo do limiar de magnitude fraca segundo a classificação de Fernández García (1996). Portanto, o TH02 apresentou ICU de fraca magnitude; mais intensas entre junho e agosto; e com configuração tanto noturna quanto diurna.

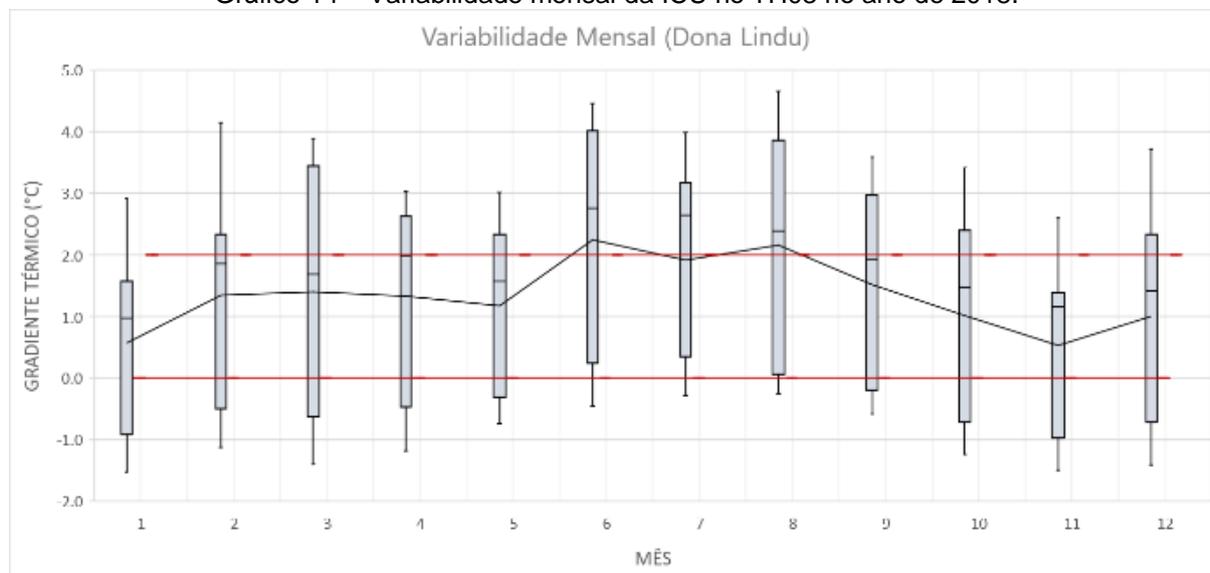
Tabela 3 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH02, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| Percentil              |             | Período Seco          |           | Período Chuvoso      |           |
|------------------------|-------------|-----------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Intervalo              | Classe      | Intervalo (°C)        | Qtd. dias | Intervalo (°C)       | Qtd. dias |
| $Q_p > 0,95$           | Ext. forte  | $X > 1.36$            | 15        | $X > 1.57$           | 6         |
| $0.75 < Q_p \leq 0.95$ | Muito forte | $0.94 < x \leq 1.36$  | 20        | $1.36 < x \leq 1.57$ | 8         |
| $0.50 < Q_p \leq 0.75$ | Forte       | $0.63 < x \leq 0.94$  | 39        | $0.92 < x \leq 1.36$ | 14        |
| $0.25 < Q_p \leq 0.50$ | Normal      | $0.25 < x \leq 0.63$  | 38        | $0.78 < x \leq 0.92$ | 19        |
| $0.15 < Q_p \leq 0.25$ | Fraca       | $0.11 < x \leq 0.25$  | 15        | $0.63 < x \leq 0.78$ | 0         |
| $0,05 < Q_p \leq 0,15$ | Muito fraca | $-0.23 < x \leq 0.11$ | 14        | $0.43 < x \leq 0.63$ | 5         |



percentis de 25% e 75%, o TH03 apresentou elevada variabilidade de ICU nos dois períodos, com destaque para os meses de março, junho e agosto; os meses de maio e dezembro se destacaram com a menor variabilidade de ICU neste ponto.

Gráfico 14 – Variabilidade mensal da ICU no TH03 no ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

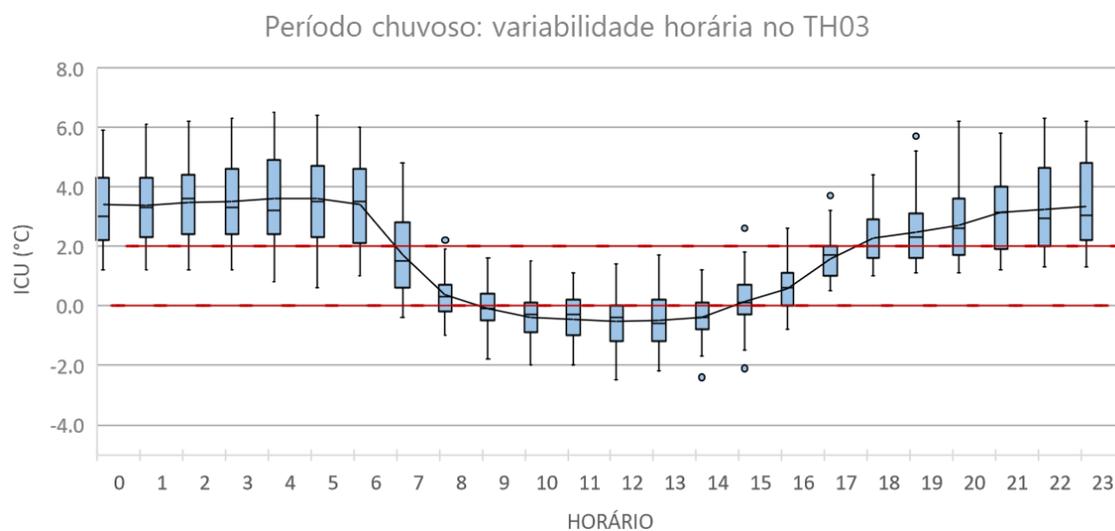
As variabilidades horárias da ICU no TH03 para os períodos seco e chuvoso estão apresentadas no Gráfico 15 e no Gráfico 16. Os diagramas desta figura mostram uma configuração de ICU que enfraquece progressivamente logo após o amanhecer (após 5h) nos dois períodos até apresentar médias negativas de ICU entre os horários de 8h e 15h (no período seco) e 9h e 14h (no período chuvoso). Indicando uma configuração de ilha de frescor no período diurno provocada possivelmente pelo seu posicionamento na linha de costa e, conseqüentemente, pela maritimidade e disponibilidade constante dos ventos alísios.

A partir das 16h (no período seco) e 15h (no período chuvoso) a ICU começa a se intensificar no TH03, apresentando comportamento crescente. No período seco as médias horárias de ICU ultrapassam 1 °C após o pôr do sol, com pouca progressão no período noturno, até se intensificar a partir da meia noite (ultrapassando 2 °C) e apresentar maior intensidade às 5h (ultrapassando 3 °C).

No período chuvoso a ICU se apresenta crescente a partir das 16h, uma hora a mais em relação ao período seco, e se intensifica ainda mais no período noturno, ultrapassando os 3 °C a partir das 22h e atingindo maior intensidade entre as 5h e 6h.

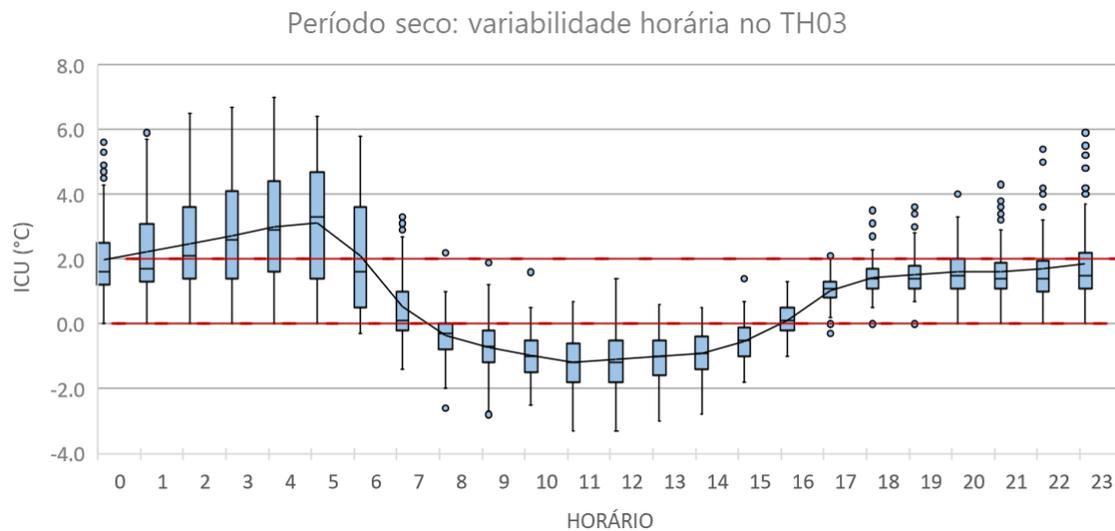
O Gráfico 15 e o Gráfico 16 indicam um contraste dos valores de ICU entre estes dois períodos, apresentando maior intensidade e variabilidade no período chuvoso.

Gráfico 15 – Variabilidade e horária da ICU no TH03 para o período seco e o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 16 – Variabilidade e horária da ICU no TH03 para o período seco e o período chuvoso do ano de 2018.



A magnitude média da ICU no TH03 na escala mensal é classificada como fraca na maioria dos meses, porém devido à elevada variabilidade ao longo do ano, as magnitudes mensais moderadas e fortes também são alcançadas. Na escala horária, a ICU no TH03 configura uma ilha de frescor bem definida no período diurno e ilha de calor mais intensa no período chuvoso, alcançando ICU extremas acima de 6 °C a partir das 19 h. No período seco a intensificação da ICU é mais lenta, tendo médias acima de 2 °C e extremos acima de 6 °C durante a madrugada.

A Tabela 4 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade relativa da ICU no TH03, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos. O Gráfico 17 apresenta a intensidade média diária da ICU no TH03 durante o ano de 2018. O período seco no TH03 apresentou maior quantidade de dias de ICU acima do normal (74 dias) em comparação ao período chuvoso (28 dias).

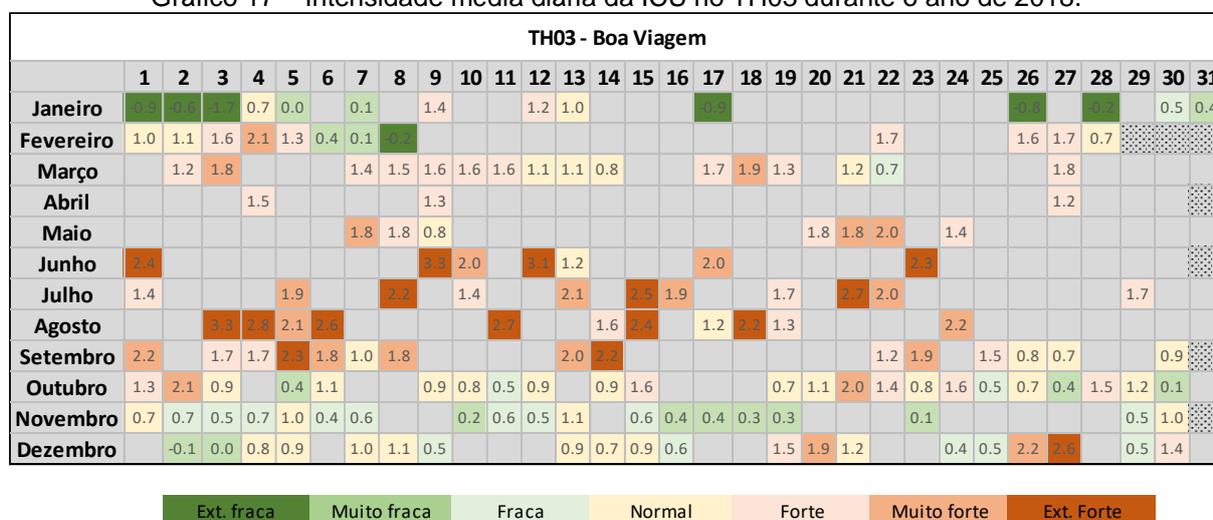
O período chuvoso e o início do seco (setembro) apresentaram maior concentração de magnitude relativa extremamente forte e o limiar desta classe para o TH03 está inserido na classe de magnitude moderada (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1996). Portanto, o TH03 apresentou ICU com magnitudes de moderada à forte; com maior intensidade entre os meses de junho e agosto; apresentando configuração noturna com maior intensidade durante a madrugada; e configuração bem definida de ilha de frescor diurna durante todo o ano.

Tabela 4 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH03, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| PERCENTIL         |             | PERÍODO SECO     |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-------------------|-------------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo         | Classe      | Intervalo (°C)   | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| Qp > 0,95         | Ext. forte  | X > 2.22         | 16        | X > 2.74        | 5         |
| 0.75 < Q p ≤ 0.95 | Muito forte | 1.79 < x ≤ 2.22  | 23        | 2.22 < x ≤ 2.74 | 10        |
| 0.50 < Q p ≤ 0.75 | Forte       | 1.20 < x ≤ 1.79  | 39        | 1.87 < x ≤ 2.22 | 12        |
| 0.25 < Q p ≤ 0.50 | Normal      | 0.67 < x ≤ 1.20  | 39        | 1.41 < x ≤ 1.87 | 14        |
| 0.15 < Q p ≤ 0.25 | Fraca       | 0.44 < x ≤ 0.67  | 18        | 1.23 < x ≤ 1.41 | 5         |
| 0,05 < Q p ≤ 0,15 | Muito fraca | -0.14 < x ≤ 0.44 | 16        | 0.78 < x ≤ 1.23 | 5         |
| Qp ≤ 0,05         | Ext. fraca  | x ≤ -0.14        | 7         | x ≤ 0.78        | 3         |

Fonte: A autora (2021)

Gráfico 17 – Intensidade média diária da ICU no TH03 durante o ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

#### 4.1.5 Dados resultantes de ICU no TH04

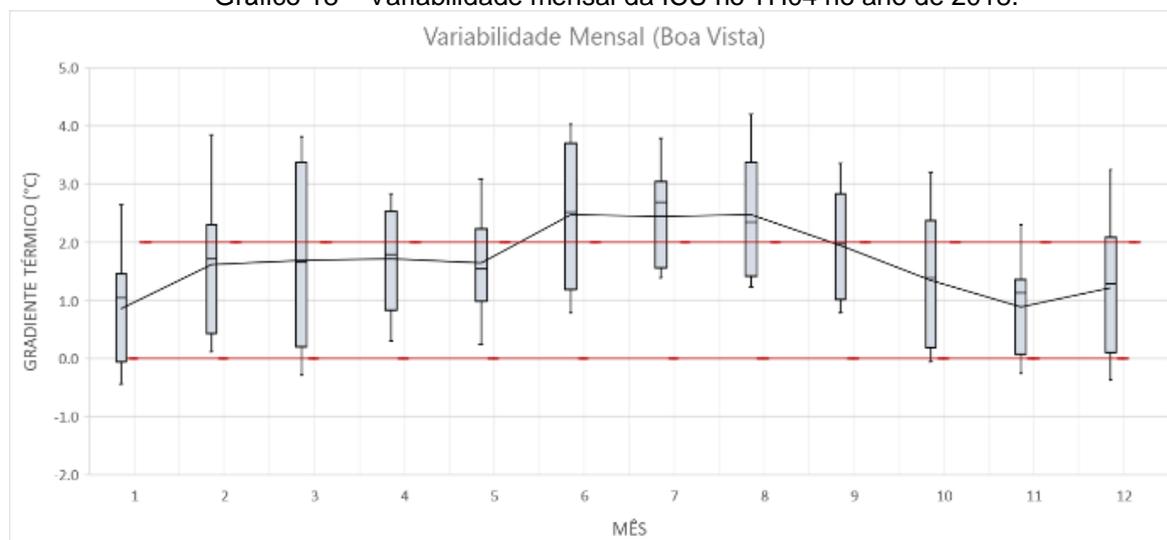
O final do período chuvoso e o início do período seco no TH04, localizado no bairro da Boa Vista, apresentaram os menores valores de Ta principalmente entre 0h e 5h dos meses de julho e agosto; apresentando amplitude térmica de 4,9 °C no período chuvoso.

Na escala diária, os valores de Ta foram mais intensos entre 9h e 15h (no período chuvoso) e 8h e 17h (no período seco), com pico às 12h. A partir do pôr do sol a intensidade da Ta diminuiu progressivamente até se apresentar mais amena durante a madrugada. O período seco apresentou Ta mais elevadas, com amplitude térmica de 3,9 °C ao longo dos meses. Os meses mais quentes no período no TH04 do estudo foram de janeiro a maio, e de outubro a dezembro.

O Gráfico 18 apresenta o gráfico de caixa da variabilidade mensal de ICU no TH04. Este ponto apresentou 2 meses (janeiro e novembro) com valores médios abaixo de 1°C, ambos pertencentes ao período seco. Além disto, 3 meses do período chuvoso (de junho a agosto) apresentaram médias acima de 2 °C. Nenhum mês apresentou médias negativas ou outliers de valores médios de ICU.

Quanto ao intervalo entre os percentis de 25% e 75%, o TH04 apresentou elevada variabilidade de ICU durante todos os meses, com destaque para os meses de março e junho; os meses de maio e novembro apresentaram menor variabilidade de ICU neste ponto.

Gráfico 18 – Variabilidade mensal da ICU no TH04 no ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

As variabilidades horárias da ICU no TH04 para os períodos seco e chuvoso estão apresentadas respectivamente pelos Gráfico 19 e Gráfico 20. Os diagramas desta figura mostram uma configuração de ICU que enfraquece logo após as 5h no

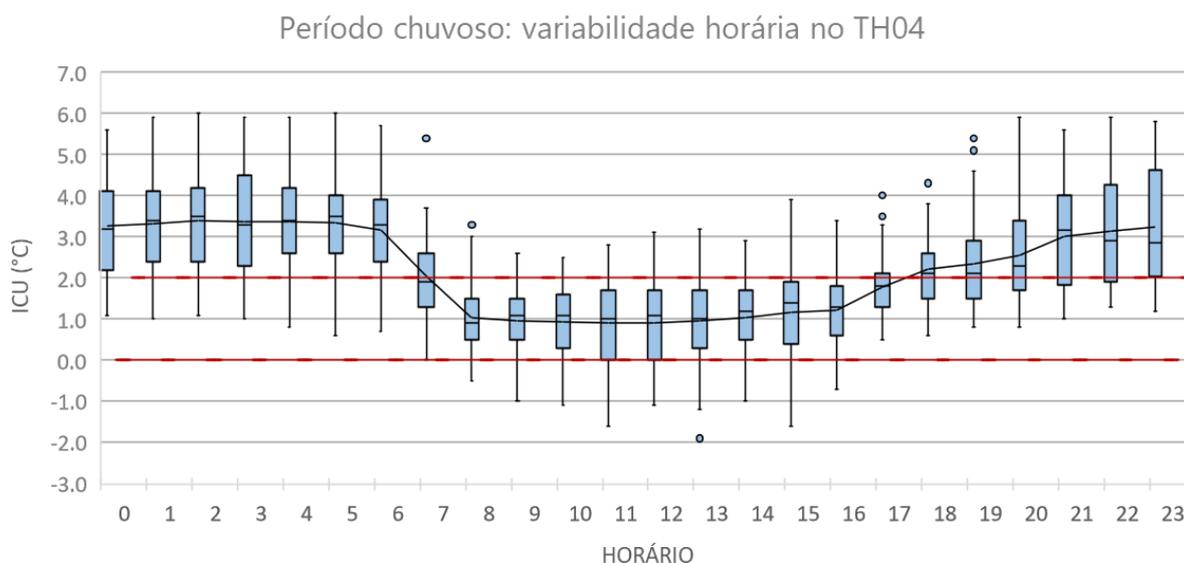
período seco e 6h no período chuvoso. Este enfraquecimento da ICU ao longo do dia se aproxima de 0 °C ao meio-dia, mas não chega a apresentar médias negativas.

A partir das 16h a ICU começa a se intensificar no TH04, apresentando comportamento crescente nos horários seguintes. No período seco as médias horárias de ICU ultrapassam 2 °C a partir da meia-noite. No período chuvoso a ICU média horária no TH04 ultrapassa 2 °C 6 horas antes do período seco, a partir das 18h, e permanece acima dos 3 °C durante toda a madrugada.

Em ambos os períodos a ICU registrada pelo TH04 é mais intensa na madrugada. O Gráfico 19 e o Gráfico 20 indicam um contraste dos valores de ICU entre os meses secos e chuvosos, apresentando maior intensidade e variabilidade no período chuvoso.

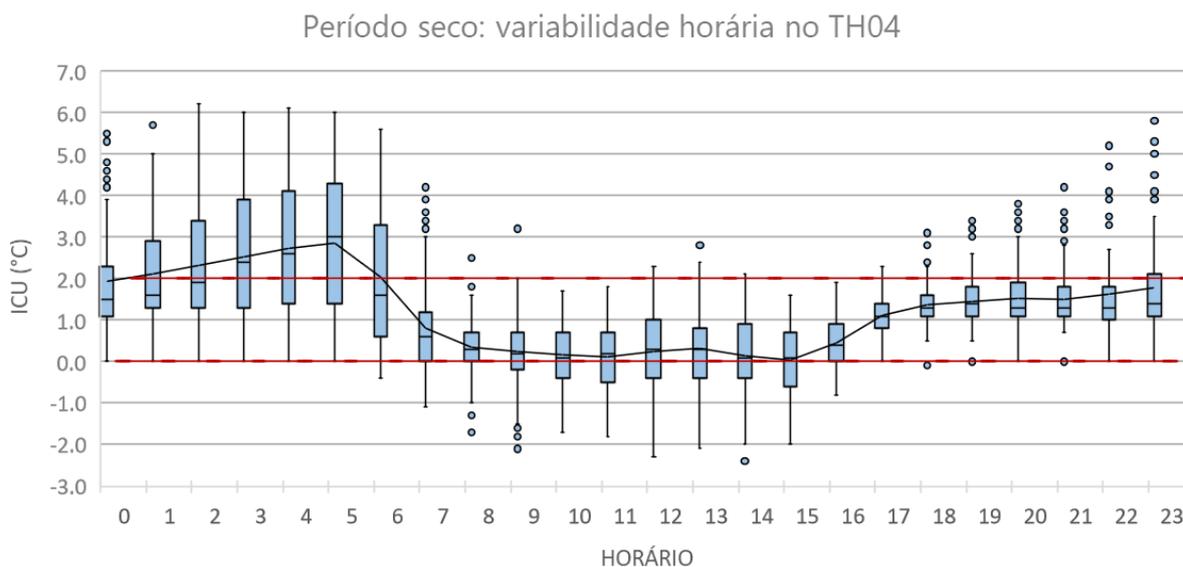
A magnitude média da ICU no TH04 na escala mensal é classificada como fraca na maioria dos meses, porém devido à elevada variabilidade ao longo do ano, as magnitudes mensais moderadas e fortes também são alcançadas. Na escala diária, a ICU no TH04 é majoritariamente fraca no período noturno (período seco) e moderada a forte (período chuvoso), apresentando a maior frequência média dos valores entre 2 °C e 4 °C, com extremos máximos acima de 6 °C na madrugada do período chuvoso.

Gráfico 19 – Variabilidade e horária da ICU no TH04 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 20 – Variabilidade e horária da ICU no TH04 para o período seco do ano de 2018.



A Tabela 5 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU no TH04, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos. O Gráfico 21 apresenta a intensidade média diária da ICU no TH04 durante o ano de 2018. O período seco no TH04 apresentou maior quantidade de dias de ICU acima do normal (79 dias) em comparação ao período chuvoso (27 dias). O período chuvoso e o início do seco (setembro) apresentaram maior concentração de magnitude relativa extremamente forte. As classes “muito forte” e extremamente forte” estão inseridas na magnitude moderada de Fernández García (1996). Portanto, o TH04 apresentou ICU com magnitudes mensal de fraca à moderada; com maior intensidade entre os meses de junho e agosto; apresentando configuração tanto diurna quanto noturna, com maior intensidade à noite e madrugada.

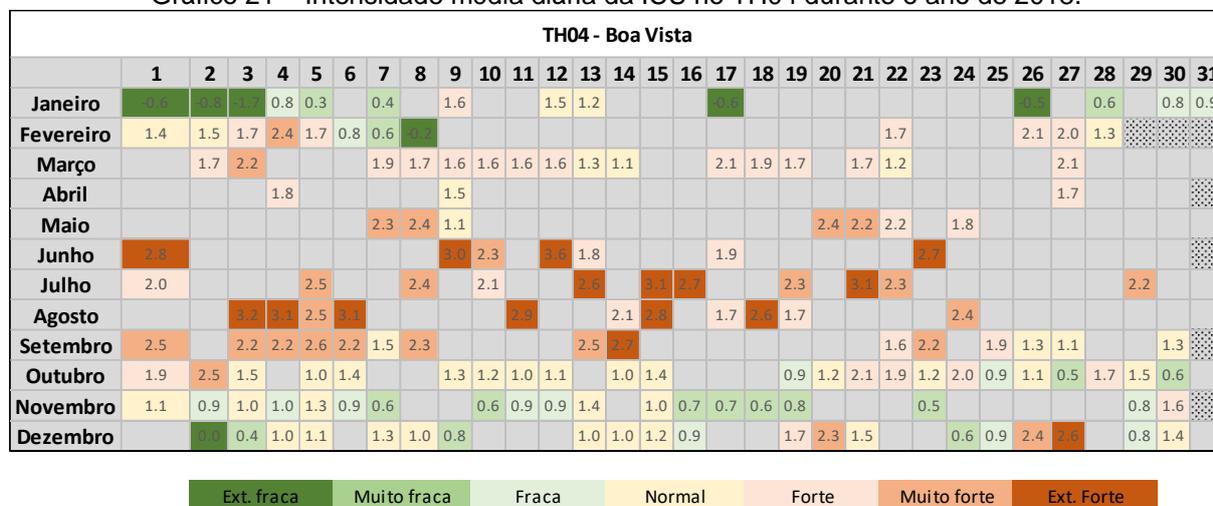
Tabela 5 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH04, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| PERCENTIL |            | PERÍODO SECO   |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-----------|------------|----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo | Classe     | Intervalo (°C) | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| Qp > 0,95 | Ext. forte | X > 2.56       | 16        | X > 3.08        | 5         |

|                      |                |                 |    |                 |    |
|----------------------|----------------|-----------------|----|-----------------|----|
| 0.75 < Q p ≤<br>0.95 | Muito<br>forte | 2.17 < x ≤ 2.56 | 25 | 2.63 < x ≤ 3.08 | 8  |
| 0.50 < Q p ≤<br>0.75 | Forte          | 1.55 < x ≤ 2.17 | 38 | 2.32 < x ≤ 2.63 | 15 |
| 0.25 < Q p ≤<br>0.50 | Normal         | 0.97 < x ≤ 1.55 | 41 | 1.89 < x ≤ 2.32 | 13 |
| 0.15 < Q p ≤<br>0.25 | Fraca          | 0.82 < x ≤ 0.97 | 15 | 1.69 < x ≤ 1.89 | 5  |
| 0,05 < Q p ≤<br>0,15 | Muito<br>fraca | 0.30 < x ≤ 0.82 | 16 | 1.24 < x ≤ 1.69 | 6  |
| Qp ≤ 0,05            | Ext. fraca     | x ≤ 0.30        | 7  | x ≤ 1.24        | 2  |

Fonte: A autora (2021)

Gráfico 21 – Intensidade média diária da ICU no TH04 durante o ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

#### 4.1.6 Dados resultantes de ICU no TH05

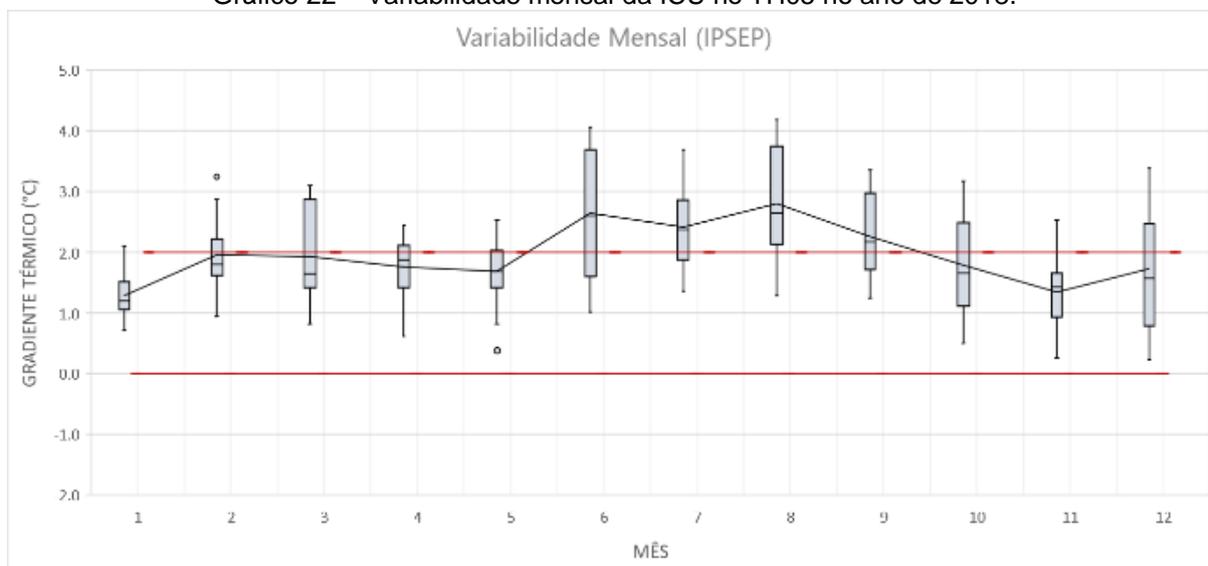
O período chuvoso e o início do período seco no TH05, localizado no bairro de Ipsep, apresentaram os menores valores de Ta principalmente nos meses entre maio e julho; com amplitude térmica de 6,3 °C no período chuvoso. Na escala diária, os valores de Ta foram mais intensos entre as 8h às 16h, com pico às 12h. A partir do pôr do sol a intensidade da Ta diminuiu progressivamente até se apresentar mais amena durante a madrugada, sobretudo às 5h no período chuvoso. O período seco apresentou Ta mais elevadas, com amplitude térmica de 5,5 °C. Os meses mais

quentes no período no TH05 do estudo foram janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

O Gráfico 22 apresenta o gráfico de caixa da variabilidade mensal de ICU no TH05. Este ponto apresentou todos os meses com valores médios mensais de ICU acima de 1°C, além disto, os meses de junho a setembro apresentaram médias de ICU acima de 2 °C. O mês de maio apresentou outlier abaixo de 5%, porém nenhum mês apresentou ICU média negativa.

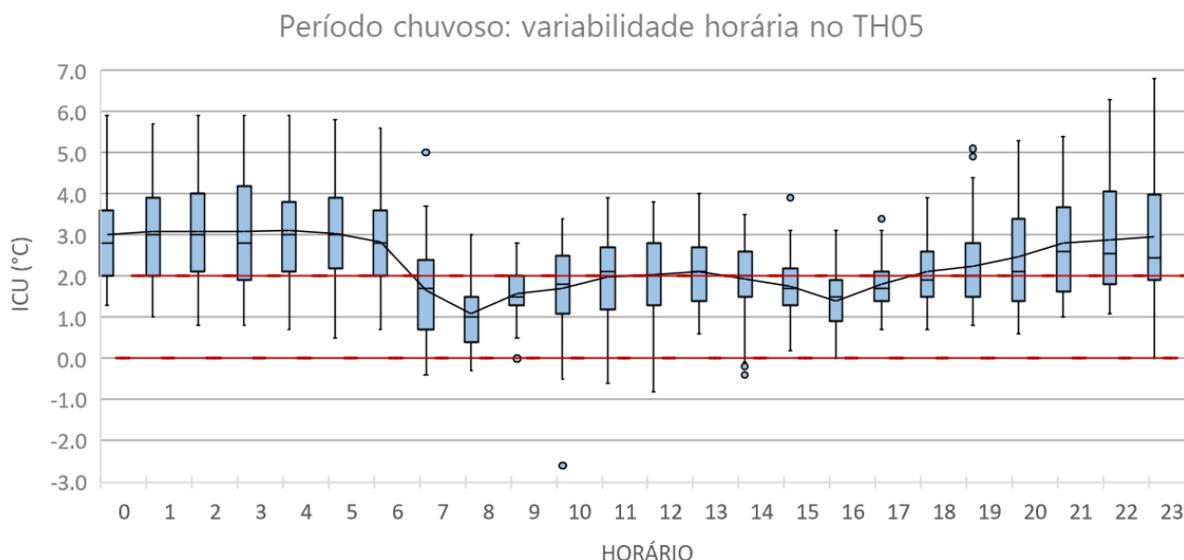
Quanto ao intervalo entre os percentis de 25% e 75%, o TH05 teve elevada variabilidade de ICU na maioria dos meses, sobretudo no período chuvoso, com destaque para o mês de março, junho e dezembro; o mês de janeiro teve a menor variabilidade de ICU neste ponto. As variabilidades horárias da ICU no TH05 para os períodos seco e chuvoso estão apresentadas pelo Gráfico 23 e pelo Gráfico 24.

Gráfico 22 – Variabilidade mensal da ICU no TH05 no ano de 2018.



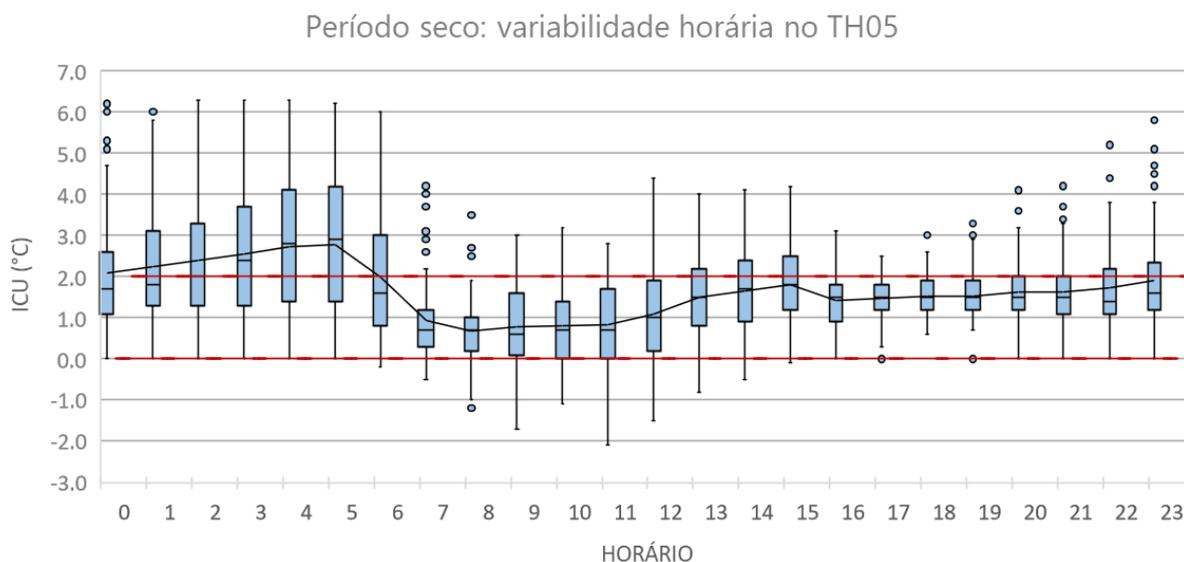
Fonte: A autora (2021)

Gráfico 23 – Variabilidade e horária da ICU no TH05 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 24 – Variabilidade e horária da ICU no TH05 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Os diagramas desta figura mostram uma configuração de ICU que enfraquece logo após as 5h (no período seco) e as 6h (no período chuvoso). Apesar deste enfraquecimento da ICU logo após o amanhecer, os valores voltam a subir a partir das 9h da manhã e continuam elevados até as 15h, nenhum horário apresenta ICU média abaixo de 1 °C no período chuvoso. Após uma breve diminuição às 16h, a ICU volta com mais intensidade às 17h e segue crescente durante a noite, principalmente no período chuvoso.

O Gráfico 23 e o Gráfico 24 indicam contraste dos valores de ICU entre os meses secos e chuvosos: O período chuvoso apresentou ICU mais intensa ao longo

do dia, atingindo média de 2 °C ao meio-dia e ultrapassando 3 °C no durante toda a madrugada. Além disto, os diagramas apresentam maior variabilidade da ICU diurna no período chuvoso e da ICU noturna no período seco. Em ambos os períodos registrados pelo TH05 a ICU média horária apresentou maior intensidade a partir das 22h. A madrugada do período seco teve valores extremos máximos de ICU mais intensas, ultrapassando 6 °C.

A Tabela 6 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU no TH05, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos.

O Gráfico 25 apresenta a intensidade média diária da ICU no TH05 durante o ano de 2018. O período seco no TH05 apresentou maior quantidade de dias de ICU acima do normal (79 dias) em comparação ao período chuvoso (27 dias). O final do período chuvoso e o início do seco apresentaram maior concentração de magnitude relativa extremamente forte. As classes “muito forte” e extremamente forte” (Tabela 6) estão inseridas na magnitude moderada de Fernández García (1996). Portanto, o TH05 apresentou ICU com magnitudes mensal de fraca à moderada; com maior intensidade entre os meses de junho e setembro; apresentando configuração tanto diurna quanto noturna, com maior intensidade à noite e madrugada.

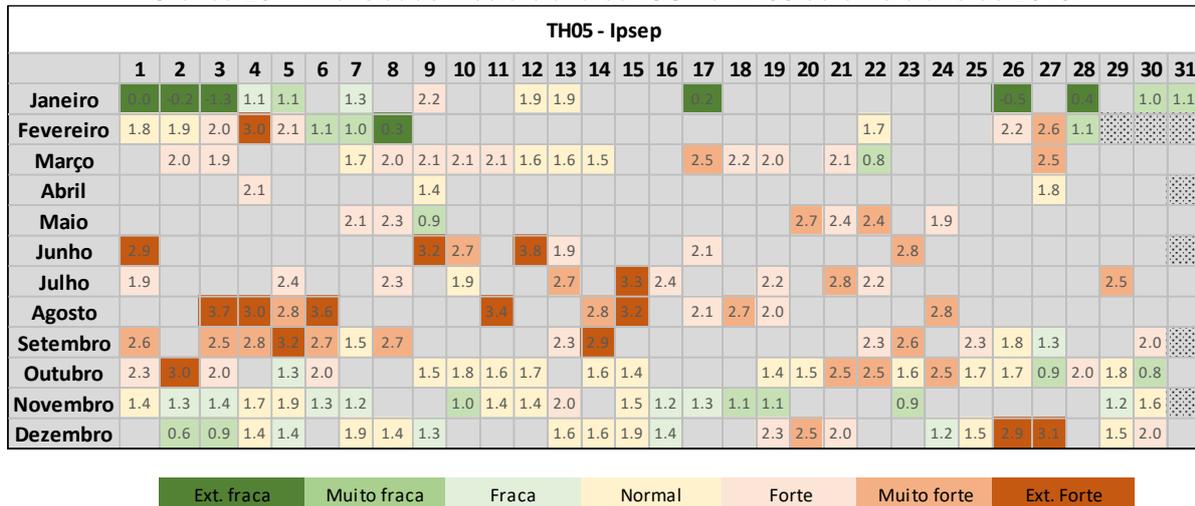
Tabela 6 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH05, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| PERCENTIL         |             | PERÍODO SECO    |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo         | Classe      | Intervalo (°C)  | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| Qp > 0,95         | Ext. forte  | X > 2.85        | 15        | X > 3.27        | 5         |
| 0.75 < Q p ≤ 0.95 | Muito forte | 2.40 < x ≤ 2.85 | 24        | 2.81 < x ≤ 3.27 | 8         |
| 0.50 < Q p ≤ 0.75 | Forte       | 1.91 < x ≤ 2.40 | 40        | 2.43 < x ≤ 2.81 | 14        |
| 0.25 < Qp ≤ 0.50  | Normal      | 1.39 < x ≤ 1.91 | 41        | 2.09 < x ≤ 2.43 | 13        |
| 0.15 < Qp ≤ 0.25  | Fraca       | 1.13 < x ≤ 1.39 | 15        | 1.93 < x ≤ 2.09 | 6         |

| PERCENTIL         |             | PERÍODO SECO    |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo         | Classe      | Intervalo (°C)  | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| 0,05 < Q p ≤ 0,15 | Muito fraca | 0.55 < x ≤ 1.13 | 16        | 1.38 < x ≤ 1.93 | 6         |
| Qp ≤ 0,05         | Ext. fraca  | x ≤ 0.55        | 7         | x ≤ 1.38        | 2         |

Fonte: A autora (2021)

Gráfico 25 – Intensidade média diária da ICU no TH05 durante o ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

#### 4.1.7 Dados resultantes de ICU no TH06

O período chuvoso e o início do período seco no TH06, localizado no bairro de Aflitos, apresentaram os menores valores de Ta, principalmente entre os meses de junho e julho; apresentando amplitude térmica de 5,9 °C durante o período chuvoso. Na escala horária, os valores de Ta foram mais intensos entre as 9h às 16h, com pico às 13h. A partir do pôr do sol a intensidade da Ta diminuiu progressivamente até se apresentar mais amena durante a madrugada, sobretudo às 5h.

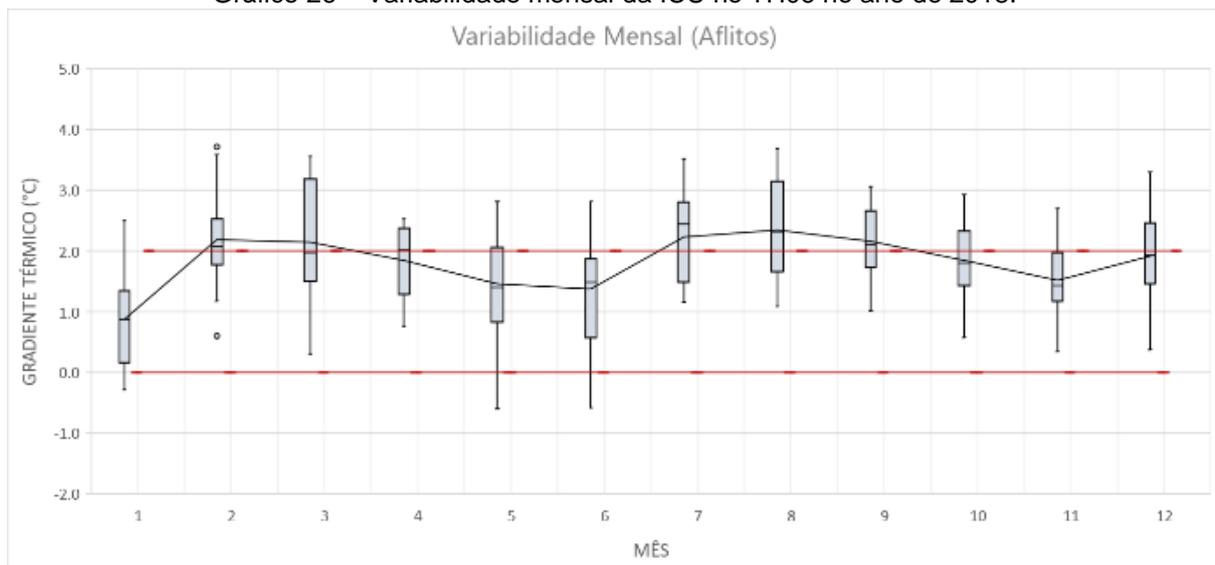
O período seco apresentou Ta mais elevadas, com amplitude térmica de 5,6 °C ao longo dos meses. Os meses mais quentes no período de estudo no TH06 foram de janeiro a março e de outubro a dezembro.

O Gráfico 26 apresenta o gráfico de caixa da variabilidade mensal de ICU no TH06. Com exceção do mês de janeiro, este ponto teve todos os meses com valores

médios acima de 1°C. Além disto, 5 meses apresentaram ICU média acima de 2 °C: fevereiro, março, julho, agosto e setembro.

Dentre eles, fevereiro apresentou a maior variabilidade, com outliers acima de 95% e abaixo de 5%. O TH06 apresentou maior variabilidade de ICU no período chuvoso, principalmente entre março e junho; novembro se destacou com a menor variabilidade de ICU. As variabilidades horárias da ICU no TH06 para os períodos seco e chuvoso estão apresentadas pelo Gráfico 27 e pelo Gráfico 28.

Gráfico 26 – Variabilidade mensal da ICU no TH06 no ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Os diagramas desta figura mostram uma configuração de ICU que enfraquece logo após o amanhecer até as 8h, em seguida, volta a aumentar progressivamente. No período seco, este aumento atinge a média de 2 °C às 14h, que se estabiliza próximo aos 1,5 °C nas horas seguintes, voltando a aumentar a partir da meia-noite (ao ultrapassar os 2 °C) e atingindo 3 °C às 5h.

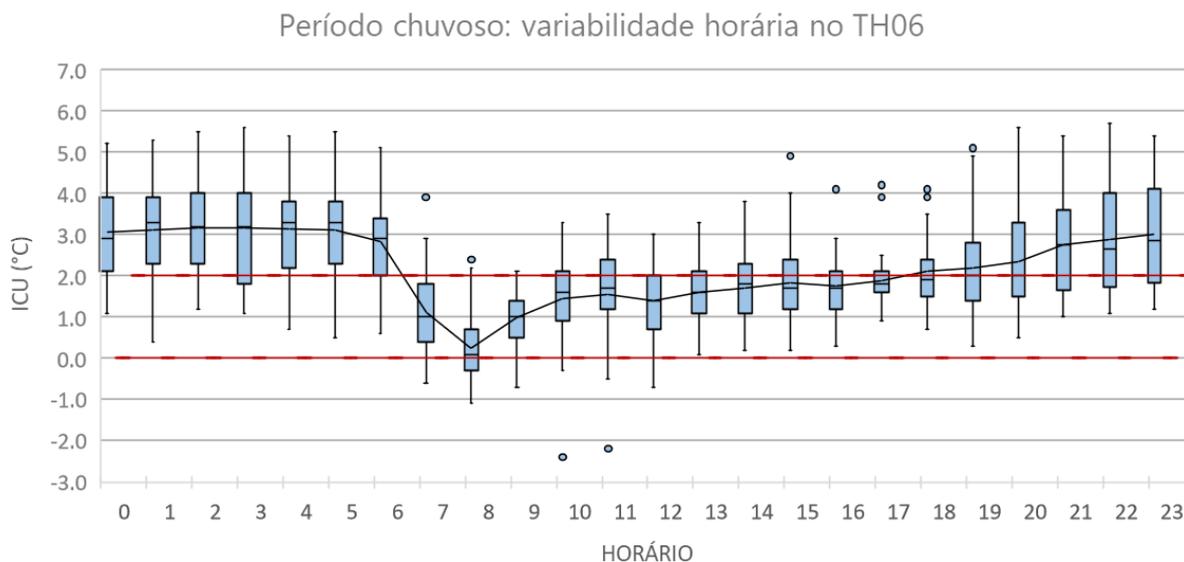
Em contrapartida, a ICU diurna é mais amena no período chuvoso (abaixo de 2 °C) nos horários vespertinos e se fortalece mais cedo no período noturno, ultrapassando os 2 °C às 19h até se estabelecer próximo aos 2,5 °C durante a madrugada.

Em ambos os períodos as médias horárias de ICU apresenta configurações tanto noturna quanto diurna. O Gráfico 27 e o Gráfico 28 indicam um contraste dos valores de ICU entre os meses secos e chuvosos: A ICU diurna no período seco é

mais intensa do que no chuvoso. Enquanto no período chuvoso é mais intensa nos horários noturnos e na madrugada.

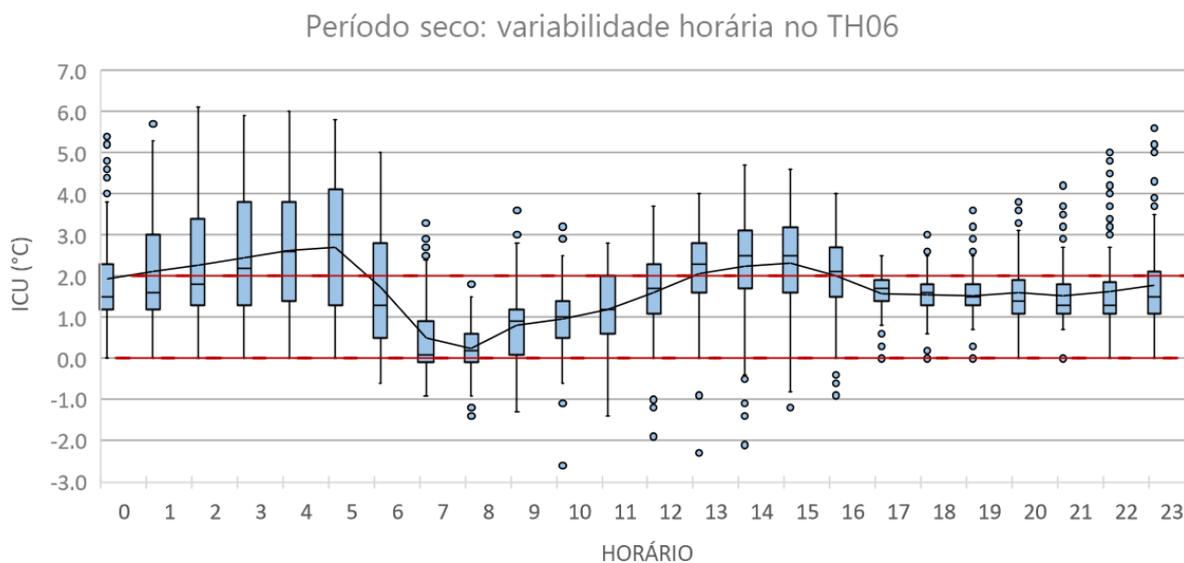
Tabela 7 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU no TH06, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos.

Gráfico 27 – Variabilidade e horária da ICU no TH06 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 28 – Variabilidade e horária da ICU no TH06 para o período seco do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

O Gráfico 29 apresenta a intensidade média diária da ICU no TH06 durante o ano de 2018. O período seco no TH06 apresentou maior quantidade de dias de ICU acima do normal (79 dias) em comparação ao período chuvoso (28 dias). O final do período chuvoso e o início do seco apresentaram maior concentração de magnitude relativa extremamente forte.

Parte da classe “forte” e as classes “muito forte” e extremamente forte” (Tabela 7) estão inseridas na magnitude moderada de Fernández García (1996). Portanto, o TH06 apresentou ICU com magnitudes mensal de fraca à moderada; com maior intensidade em dois períodos: de fevereiro a março e de julho a setembro; apresentando configuração tanto diurna quanto noturna, com maior intensidade à noite e madrugada.

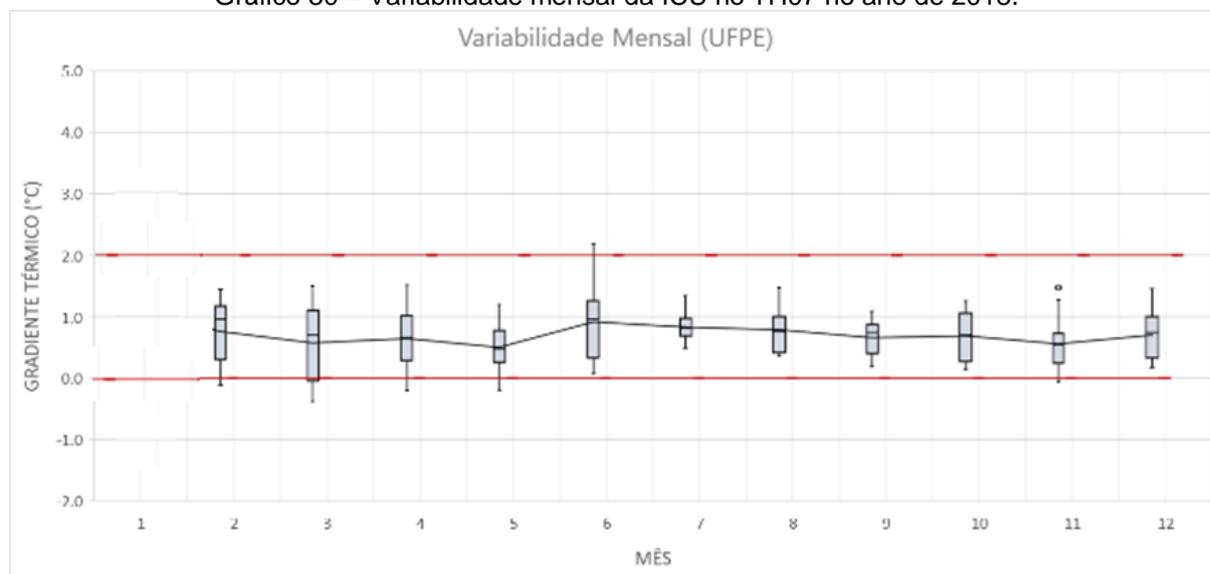
Tabela 7 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH06, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| PERCENTIL         |             | PERÍODO SECO    |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo         | Classe      | Intervalo (°C)  | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| Qp > 0,95         | Ext. forte  | X > 2.73        | 14        | X > 2.88        | 5         |
| 0.75 < Q p ≤ 0.95 | Muito forte | 2.26 < x ≤ 2.73 | 26        | 2.61 < x ≤ 2.88 | 8         |



O Gráfico 30 apresenta o gráfico de caixa da variabilidade mensal de ICU no TH07. Com exceção do mês de janeiro, este ponto apresentou todos os meses com valores médios de ICU abaixo de 1°C. Nenhum outro mês apresentou ICU média acima de 2°C nem médias negativas, porém o mês de novembro teve outliers acima de 95%.

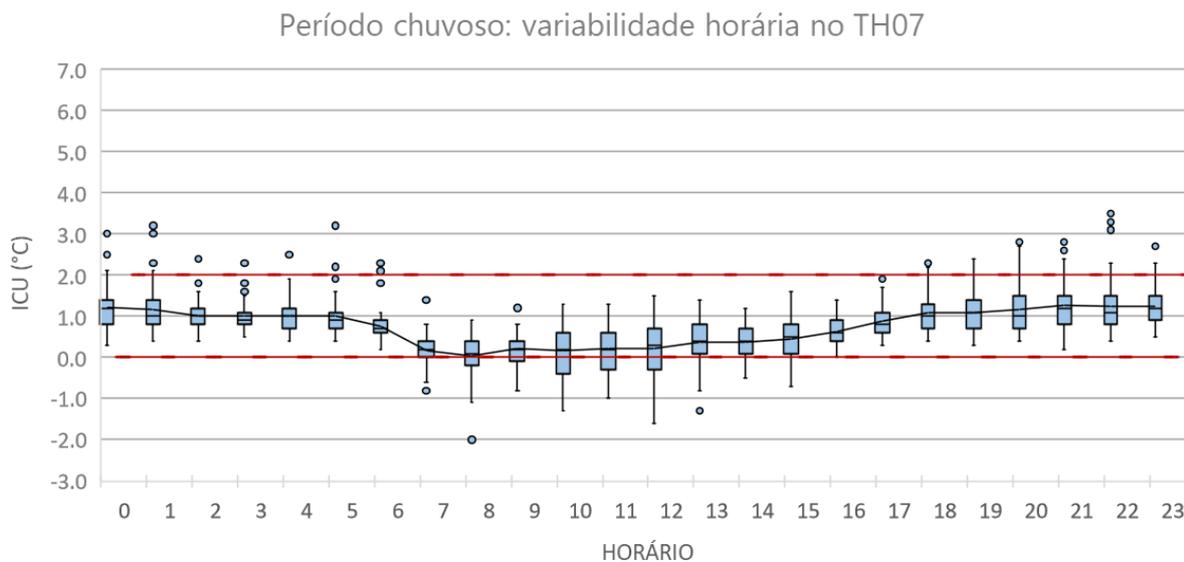
Gráfico 30 – Variabilidade mensal da ICU no TH07 no ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

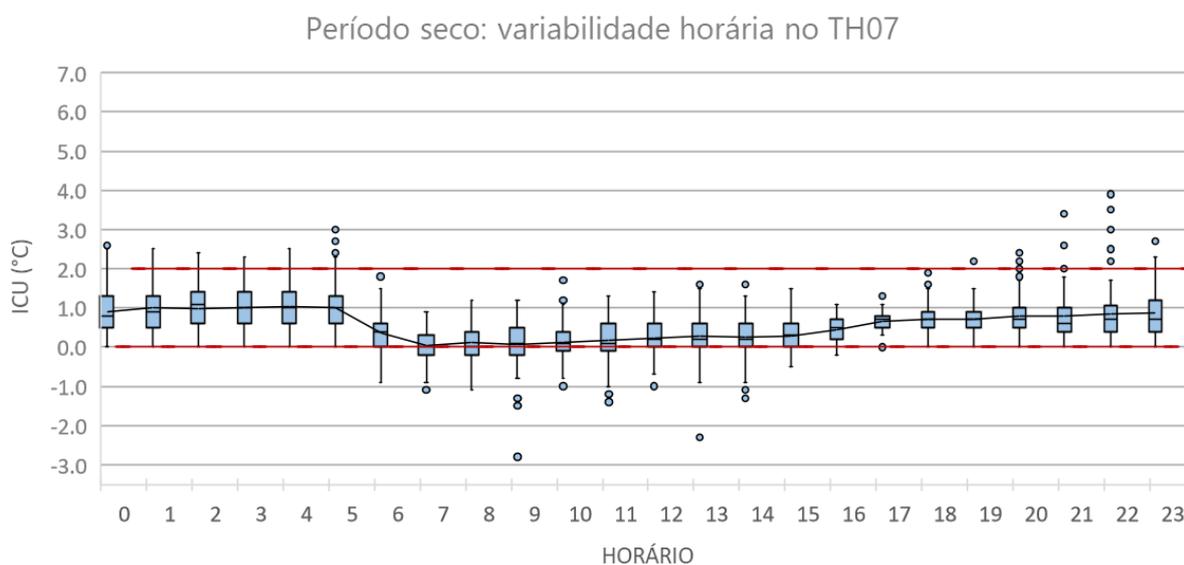
O TH07 apresentou maior variabilidade de ICU nos meses de fevereiro e junho; os meses de julho e setembro se destacaram com a menor variabilidade de ICU neste ponto. As variabilidades horárias da ICU no TH07 para os períodos seco e chuvoso estão apresentadas pelo Gráfico 31 e Gráfico 32.

Gráfico 31 – Variabilidade e horária da ICU no TH07 para o período chuvoso do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Gráfico 32 – Variabilidade e horária da ICU no TH07 para o período seco do ano de 2018.



Fonte: A autora (2021)

Os diagramas desta figura mostram uma configuração de ICU fraca, que se anula logo após o amanhecer nos dois períodos, sem chegar a alcançar médias negativas. A ICU média horária registrada no TH07 é principalmente noturna. No período seco as médias horárias de ICU ultrapassam 1 °C, com extremos máximos entre 2 °C e 4 °C. No período chuvoso a ICU média horária no TH07 ultrapassa 1 °C logo no início da noite, às 19h e perde força durante a madrugada, tendo maior intensidade às 21h. O Gráfico 31 e o Gráfico 32 indicam ICU fraca e pouco contraste

dos valores entre os meses secos e chuvosos, com maior intensidade e variabilidade no período seco.

A magnitude geral da ICU (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1996) no TH07, tanto na escala diária quanto mensal, é majoritariamente fraca, apresentando a maior frequência dos valores entre 0 °C e 2 °C. A

Tabela 8 apresenta os intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade relativa diária da ICU no TH07, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe para os respectivos períodos.

O Gráfico 33 apresenta a intensidade relativa diária da ICU no TH07 durante o ano de 2018. O período seco no TH01 apresentou maior quantidade de dias de ICU com magnitude relativa acima do normal (81 dias) em comparação ao período chuvoso (28 dias).

O período chuvoso apresentou maior concentração de magnitude relativa extremamente forte, principalmente entre os meses de junho e agosto. Porém, todos os limiares de classes de magnitude relativa calculados para a TH07 estão abaixo do limiar de magnitude fraca segundo a classificação de Fernández García (1996). Portanto, o TH07 apresentou ICU de fraca magnitude, mais intensa no mês de junho e predominantemente noturna.

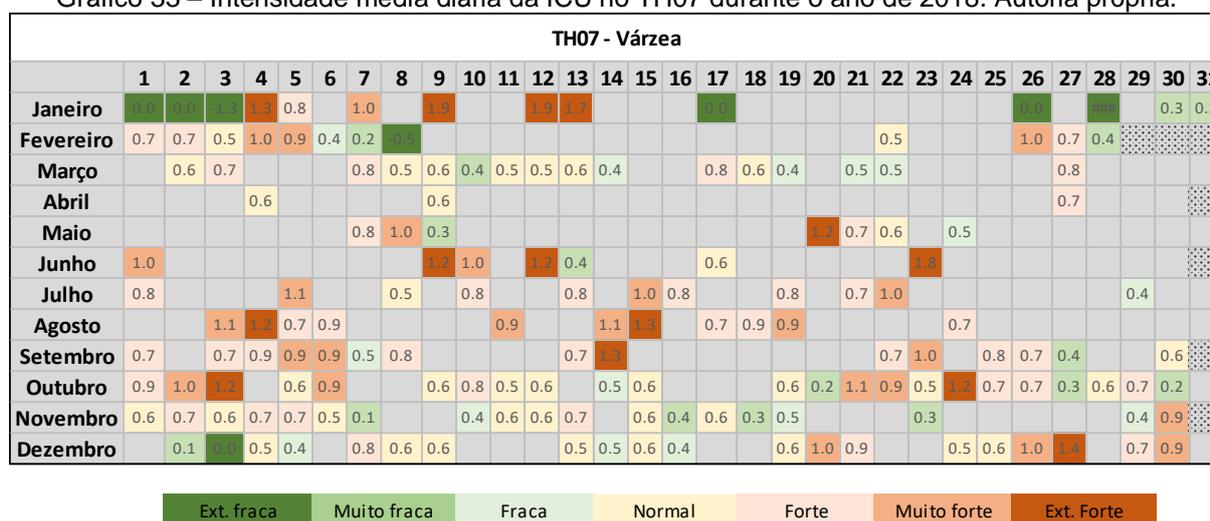
Tabela 8 – Intervalos quantílicos que determinaram a delimitação das classes de intensidade de ICU para o TH07, seus limites para os períodos chuvosos e secos e a quantidade de dias registrados em cada classe e período.

| PERCENTIL         |             | PERÍODO SECO    |           | PERÍODO CHUVOSO |           |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Intervalo         | Classe      | Intervalo (°C)  | Qtd. dias | Intervalo (°C)  | Qtd. dias |
| Qp > 0,95         | Ext. forte  | X > 1.11        | 14        | X > 1.19        | 5         |
| 0.75 < Q p ≤ 0.95 | Muito forte | 0.88 < x ≤ 1.11 | 25        | 0.97 < x ≤ 1.19 | 8         |
| 0.50 < Q p ≤ 0.75 | Forte       | 0.65 < x ≤ 0.88 | 42        | 0.81 < x ≤ 0.97 | 15        |
| 0.25 < Q p ≤ 0.50 | Normal      | 0.50 < x ≤ 0.65 | 38        | 0.66 < x ≤ 0.81 | 13        |

|                        |             |                      |    |                      |   |
|------------------------|-------------|----------------------|----|----------------------|---|
| $0.15 < Q_p \leq 0.25$ | Fraca       | $0.38 < x \leq 0.50$ | 15 | $0.56 < x \leq 0.66$ | 5 |
| $0,05 < Q_p \leq 0,15$ | Muito fraca | $0.05 < x \leq 0.38$ | 16 | $0.37 < x \leq 0.56$ | 6 |
| $Q_p \leq 0,05$        | Ext. fraca  | $x \leq 0.05$        | 8  | $x \leq 0.37$        | 2 |

Fonte: A autora (2021)

Gráfico 33 – Intensidade média diária da ICU no TH07 durante o ano de 2018. Autoria própria.



Fonte: A autora (2021)

## 4.2 RESULTANTES DA DIMENSÃO ESPACIAL DA ICU NOS DIAS REPRESENTATIVOS

A análise dos dados de ICU apresentada no capítulo anterior explicou pontualmente a suas intensidades e as variabilidades. Nisto, as classes de magnitude relativa de ICU (calculadas pelos percentis) para cada dia foram apresentadas nos gráficos de intensidade média diária da ICU em cada TH (Gráfico 9, Gráfico 13, Gráfico 17, Gráfico 21, Gráfico 25, Gráfico 29 e Gráfico 33 ).

Estes gráficos mostraram que as intensidades relativas diárias também variaram entre os TH, por exemplo, a magnitude da ICU média diária registrada no dia 1 de setembro foi classificada como “forte” no TH01 e TH07 enquanto nos demais TH a magnitude relativa foi classificada como “muito forte”.

A escolha do dia representativo de ICU para cada período, tanto seco quanto chuvoso, foi realizada a partir da identificação dos dias que registraram intensidade relativa diária de ICU “extremamente forte” em todos os TH, em seguida foram

selecionados os que apresentaram os valores mais intensos de ICU. Portanto, o dia 12 de junho foi selecionado para representar o período chuvoso e o dia 27 de dezembro para representar o período seco. Os dados de ICU destes dias foram utilizados no procedimento da modelagem da ICU descrita no Capítulo 3.2.5.

A Tabela 9 apresenta as correlações globais de cada simulação, as quais variaram entre 0,72 e 0,96 para o dia representativo chuvoso, e entre 0,67 e 0,92 no dia representativo seco. De forma geral, as correlações globais foram melhores nos horários noturnos para os dois dias.

Tabela 9 – Correlações globais das simulações para os dias representativos.

| <b>Dia</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>15h</b> | <b>18h</b> | <b>21h</b> | <b>0h</b> | <b>3h</b> | <b>5h</b> |
|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 12/06/18   | 0,89      | 0,89       | 0,72       | 0,95       | 0,96       | 0,94      | 0,92      | 0,95      |
| 27/12/18   | 0,70      | 0,71       | 0,77       | 0,67       | 0,91       | 0,92      | 0,80      | 0,80      |

Fonte: A autora (2021). Formato baseado em Amorim (2021).

As correlações estatísticas entre cada classe em cada janela selecionada estão apresentadas na Tabela 10 e na Tabela 11 para o dia representativo chuvoso e seco respectivamente. Estas tabelas mostram que as correlações entre a ICU e os corpos hídricos foi muito próxima de zero em todas as janelas, variando entre  $-0,04$  e  $0,09$ .

A vegetação apresentou elevada correlação negativa com a ICU em quase todos os horários, com os maiores valores nos horários noturnos (quando a ICU está mais intensa); as correlações positivas foram baixas ( $0,08$  e  $0,14$ ) e registradas às 9h e 12h do dia representativo seco. A predominância do coeficiente negativo na classe vegetação representa o papel desta classe em reduzir a intensidade da ICU.

O contrário ocorre com as demais classes (3, 4 e 5) que representam a cobertura edificada. Em geral, estas classes também apresentaram os melhores valores em janelas mais largas, assim como verificado por Amorim (2020) e por Foissard et al. (2019).

Tabela 10 – Correlações estatísticas entre a intensidade da ICU e as classes de entrada do modelo para o dia representativo do período chuvoso.

| <b>12/06/18</b>    | <b>9h</b>            | <b>12h</b>         | <b>15h</b>         | <b>18h</b>      | <b>21h</b>         | <b>0h</b>          | <b>3h</b>            | <b>5h</b>          |
|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 1(Corpos hídricos) | 7x7<br>(0,01)        | 7x7<br>(0,02)      | 7x7<br>(0,03)      | 5x5<br>(0,03)   | 5x5<br>(0,03)      | 5x5<br>(0,03)      | 5x5<br>(0,03)        | 5x5<br>(0,03)      |
| 2(Vegetação)       | 7x7<br>(-<br>0,02)   | 7x7<br>(-<br>0,66) | 7x7<br>(-<br>0,66) | 7x7<br>(0,87)   | 7x7<br>(-<br>0,91) | 7x7<br>(-<br>0,95) | 17x17<br>(-<br>0,95) | 7x7<br>(-<br>0,83) |
| 3(Solo)            | 13x13<br>(0,11)      | 17x17<br>(0,74)    | 17x17<br>(0,64)    | 17x17<br>(0,56) | 17x17<br>(0,63)    | 17x17<br>(0,70)    | 17x17<br>(0,67)      | 17x17<br>(0,55)    |
| 4(Urb. Horizontal) | 5x5<br>(0,61)        | 17x17<br>(0,46)    | 5x5<br>(0,78)      | 17x17<br>(0,75) | 17x17<br>(0,76)    | 17x17<br>(0,77)    | 17x17<br>(0,81)      | 9x9<br>(0,76)      |
| 5(Urb. Vertical)   | 13x13<br>(-<br>0,16) | 7x7<br>(0,16)      | 13x13<br>(0,31)    | 13x13<br>(0,64) | 13x13<br>(0,60)    | 13x13<br>(0,60)    | 13x13<br>(0,54)      | 13x13<br>(0,58)    |

Fonte: A autora (2021). Formato baseado em Amorim (2021).

Tabela 11 – Correlações estatísticas entre a intensidade da ICU e as classes de entrada do modelo para o dia representativo do período seco.

| <b>27/12/18</b>    | <b>9h</b>            | <b>12h</b>         | <b>15h</b>           | <b>18h</b>         | <b>21h</b>         | <b>0h</b>            | <b>3h</b>          | <b>5h</b>          |
|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 1(Corpos hídricos) | 7x7<br>(-<br>0,04)   | 7x7<br>(-<br>0,01) | 7x7<br>(-<br>0,06)   | 5x5<br>(0,09)      | 5x5<br>(0,02)      | 5x5<br>(0,02)        | 5x5<br>(0,03)      | 5x5<br>(0,02)      |
| 2(Vegetação)       | 5x5<br>(0,08)        | 13x13<br>(0,14)    | 5x5<br>(-<br>0,33)   | 5x5<br>(-<br>0,90) | 7x7<br>(-<br>0,86) | 17x17<br>(-<br>0,88) | 7x7<br>(-<br>0,84) | 7x7<br>(-<br>0,78) |
| 3(Solo)            | 17x17<br>(0,30)      | 5x5<br>(0,28)      | 9x9<br>(0,75)        | 17x17<br>(0,76)    | 17x17<br>(0,61)    | 17x17<br>(0,61)      | 17x17<br>(0,53)    | 17x17<br>(0,38)    |
| 4(Urb. Horizontal) | 5x5<br>(0,34)        | 17x17<br>(0,06)    | 17x17<br>(-<br>0,04) | 17x17<br>(0,37)    | 17x17<br>(0,62)    | 17x17<br>(0,84)      | 17x17<br>(0,79)    | 13x13<br>(0,68)    |
| 5(Urb. Vertical)   | 13x13<br>(-<br>0,49) | 7x7<br>(-<br>0,84) | 7x7<br>(-<br>0,19)   | 13x13<br>(0,52)    | 13x13<br>(0,62)    | 13x13<br>(0,43)      | 9x9<br>(0,60)      | 13x13<br>(0,73)    |

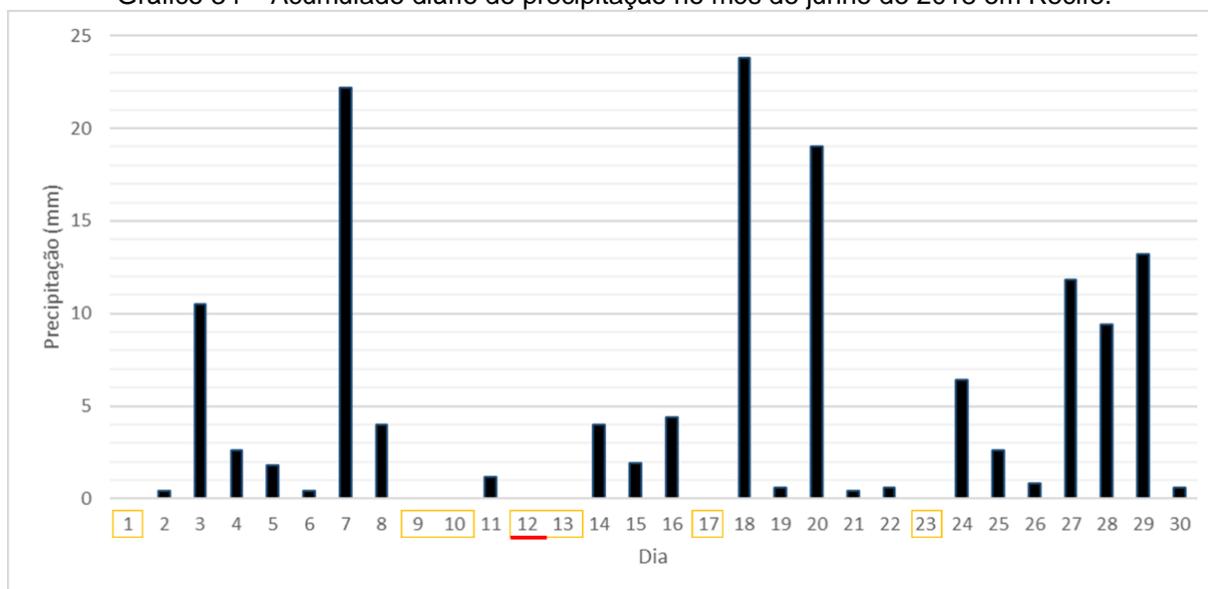
Fonte: A autora (2021). Formato baseado em Amorim (2021).

#### 4.2.1 Análise espacial da ICU no dia representativo do período chuvoso

O mês de junho se destacou na análise dos dados observados por estar presente no período de maior intensidade de ICU em todos os TH. Devido à elevada frequência de chuvas, apenas sete dias deste mês não registraram precipitação e foram selecionados para a análise de ICU. O Gráfico 34 apresenta os valores de precipitação diária no mês de junho de 2018 e destaca estes dias.

Enquanto os dias 01, 17 e 23 de junho foram antecedidos e seguidos de dias de chuva, o período entre os dias 09 e 13 representaram uma relativa estiagem. Dentre estes dias, o único que registrou precipitação foi o dia 11, com apenas 0,4 mm. O dia 12, representativo de ICU para o período chuvoso, se posicionou nesta relativa estiagem. O Gráfico 35 mostra os valores horários de ICU nos TH durante o dia 12 de junho e a Figura 26 apresenta estes valores estimados pelo modelo ao longo da área de estudo em 8 horários específicos (9, 12, 15, 18, 21, 0, 3 e 5 horas).

Gráfico 34 – Acumulado diário de precipitação no mês de junho de 2018 em Recife.



Fonte: A autora (2021).

O nascer do sol neste dia ocorreu às 05:29 horas, o início do dia (6 h) marcou valores elevados de ICU na maioria dos TH, ainda decorrentes da dissipação da ICU do dia anterior. O período matutino apresentou ICU predominantemente fraca (de 0 a 2 °C), com registro prolongado de ilha de frescor nos TH02 e TH03. A elevada incidência de radiação solar ao meio-dia reduziu os contrastes térmicos entre as superfícies, de modo que a estimativa da ICU neste horário foi próxima a 0 °C na maior parte da cidade.

O período vespertino apresentou um aumento gradual da ICU, sem registro nem estimativa de ilha de frescor. Enquanto os TH do Grupo 1 continuaram com ICU predominantemente fraca, os demais começaram a registrar ICU moderada (de 2 a 4 °C) a partir das 14 horas. A estimativa da ICU às 15 horas indica pequenas áreas isoladas de ICU acima de 3 °C, principalmente nos bairros do Recife e da Imbiribeira.

Dentre os três TH pertencentes ao Grupo 1, os quais apresentam paisagem de entorno mais próximos ao da Eref, o TH02 e o TH07 permaneceram registrando ICU de fraca a moderada durante todo o período noturno. O pôr-do-sol foi registrado às 17:09 h, a partir deste horário, a ICU se intensificou mais rapidamente nos TH do Grupo 2 e no TH01, de modo que às 20 horas a ICU já se apresentava como forte (de 4 a 6 °C) nestes TH. Os mapas de ICU entre as 18h e 0h mostram que durante o período noturno os núcleos de ICU forte (de 4 a 6 °C) e muito forte (acima de °C) se intensificaram e se expandiram ao longo da malha urbana neste dia.

Enquanto o TH02 e TH07 atingiram ICU máxima às 00 h e às 20 h respectivamente, nos demais TH a ICU continuou a aumentar ao longo da madrugada, ultrapassando 5 °C em todos os TH do Grupo 2 e alcançando classe de intensidade muito forte (acima de 6 °C) no TH03. Este maior contraste térmico entre os grupos favoreceu o ressurgimento das ilhas de frescor a partir da meia noite nos ambientes com maior presença de vegetação e ICU mais intensas nos seus núcleos, principalmente entre as 2 e 3 horas.

Gráfico 35 – Valores horários de ICU em cada TH durante o dia 12 de junho de 2018.

ICU horária (12/06)

|      | 6   | 7    | 8   | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| TH01 | 3.0 | 0.5  | 0.7 | -0.5 | 0.0  | 0.2  | 0.7  | 0.0  | 0.8 | 0.5 | 0.2 | 1.3 | 2.8 | 3.0 | 4.0 | 4.1 | 4.0 | 4.4 | 4.8 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 4.4 | 2.5 |
| TH02 | 0.6 | -0.7 | 0.7 | -0.8 | -0.1 | 0.9  | -0.2 | -0.7 | 1.0 | 0.8 | 0.1 | 1.1 | 1.7 | 1.8 | 2.3 | 2.6 | 2.6 | 3.1 | 3.4 | 2.6 | 2.8 | 3.1 | 1.9 | 1.7 |
| TH03 | 4.3 | 1.5  | 1.2 | -0.6 | -0.4 | -0.3 | -0.6 | -0.6 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 2.0 | 3.6 | 4.1 | 5.1 | 4.9 | 4.8 | 5.3 | 5.9 | 5.8 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 5.8 |
| TH04 | 4.0 | 1.8  | 2.1 | 0.7  | 1.1  | 1.5  | 1.0  | 1.2  | 2.7 | 2.6 | 1.4 | 2.2 | 3.5 | 3.9 | 4.9 | 4.8 | 4.6 | 5.0 | 5.6 | 5.5 | 5.9 | 5.8 | 5.7 | 5.8 |
| TH05 | 5.0 | 2.2  | 2.0 | 0.5  | 0.6  | 1.8  | 1.0  | 1.5  | 3.7 | 2.4 | 1.2 | 2.1 | 3.4 | 3.8 | 4.8 | 4.8 | 4.6 | 5.5 | 5.8 | 5.6 | 6.0 | 5.8 | 5.7 | 5.6 |
| TH06 | 3.4 | 0.6  | 1.3 | 0.1  | 1.2  | 1.4  | 0.8  | 0.8  | 2.4 | 1.6 | 1.3 | 1.6 | 3.0 | 3.4 | 4.3 | 4.4 | 4.3 | 4.7 | 5.3 | 5.2 | 5.4 | 5.4 | 5.2 | 5.3 |
| TH07 | 1.0 | 0.7  | 1.2 | 0.0  | 0.3  | 0.9  | 0.1  | 0.3  | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 1.2 | 2.0 | 2.1 | 3.2 | 2.5 | 3.0 | 2.5 | 1.6 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.8 | 0.6 |

Gradiente: -0.8 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.2

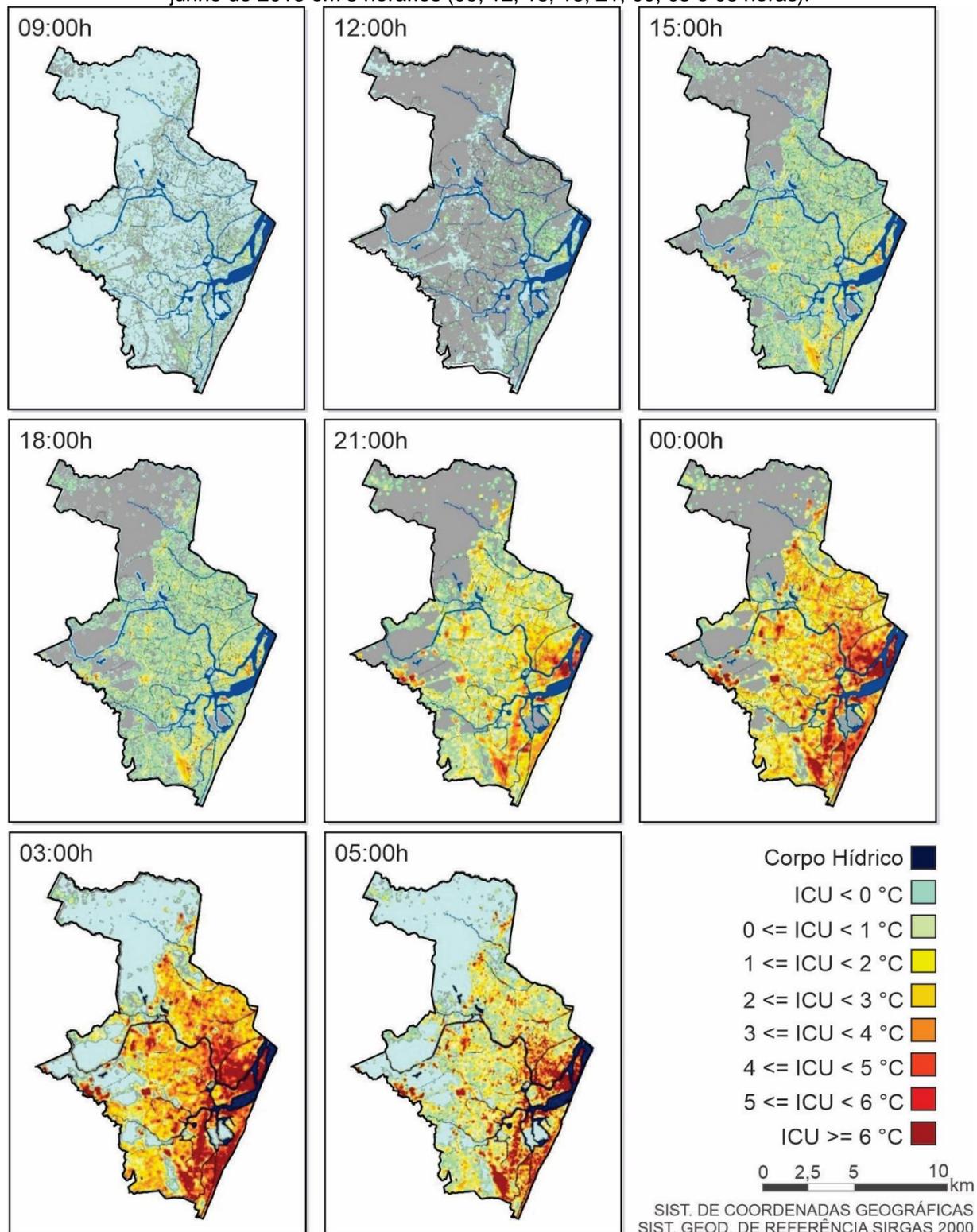
Fonte: A autora (2021).

Neste dia, os maiores valores de ICU no grupo de pontos ocorreu às 2 horas, por isto, este momento foi identificado como o horário de ICU máxima ( $ICU_{max}$ ) no dia

representativo chuvoso. A Figura 27 mostra estes valores estimados neste horário e distribuídos pelos bairros de acordo com a classe de magnitude.

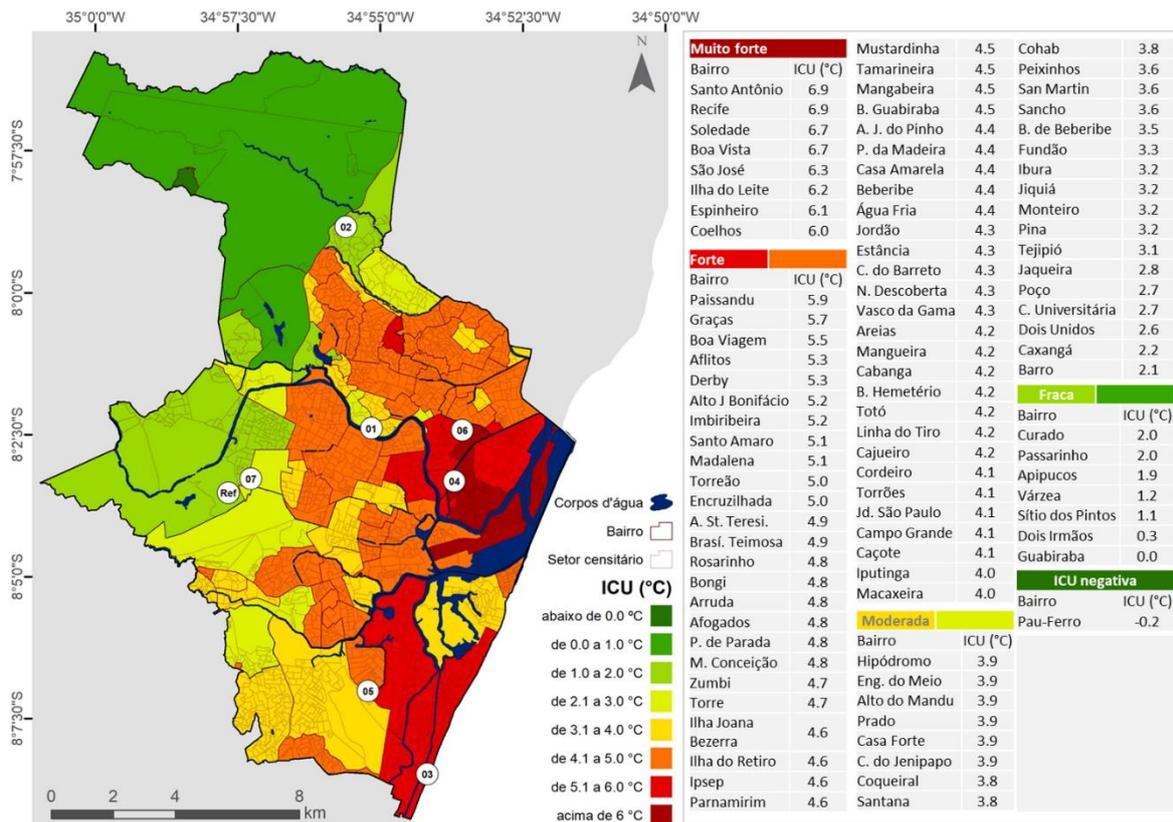
A RPA 01 concentrou os bairros que tiveram  $ICU_{max}$  classificada como “muito forte”, o bairro de Espinheiro, apesar de estar localizado na RPA03, faz limite com a RPA 01 e também apresentou  $ICU_{max}$  muito forte. Na Zona Sul, os bairros da orla marítima (Boa Viagem e Pina) e da Imbiribeira apresentaram  $ICU_{max}$  forte, acima de 5 °C.

Figura 26 – Espacialização da ICU ao longo da área de estudo estimada pelo modelo no dia 12 de junho de 2018 em 8 horários (09, 12, 15, 18, 21, 00, 03 e 05 horas).



Fonte: A autora (2021).

Figura 27 – Intensidade máxima de ICU nos bairros de Recife no período chuvoso.



Fonte: A autora (2021).

#### 4.2.2 Análise espacial da ICU no dia representativo do período seco

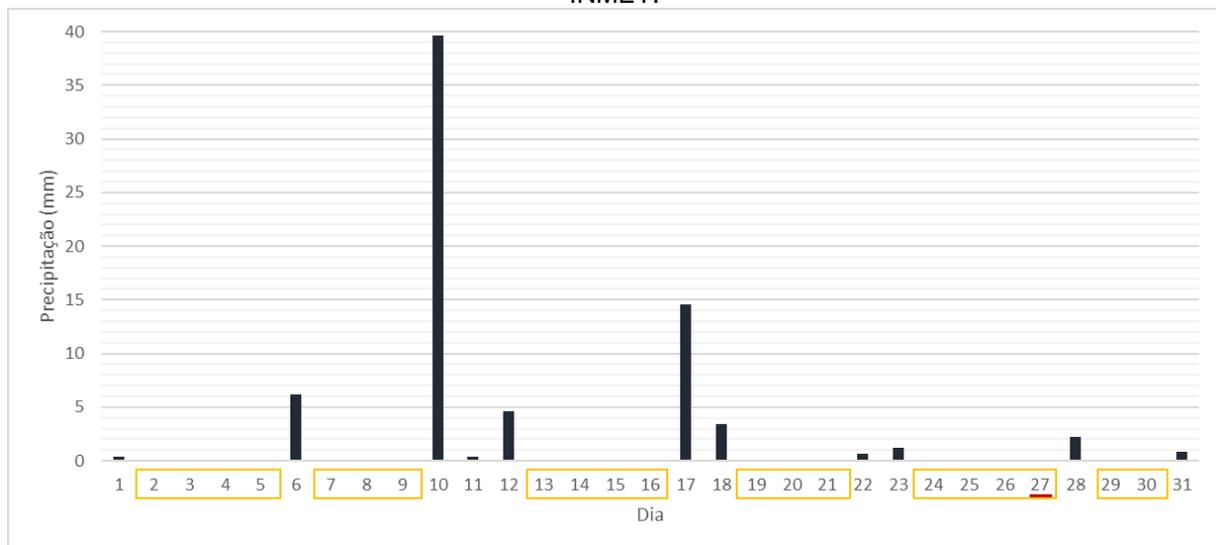
O mês de dezembro de 2018 totalizou 20 dias sem registro de precipitação, os quais foram utilizados para a análise de ICU. Dentre eles, o dia 27 foi identificado como o dia representativo do período seco, este dia encerrou um intervalo de relativa estiagem de 9 dias, no qual foram registrados apenas 0,7 mm de precipitação no dia 22 e 1,2 mm no dia 23. O Gráfico 36 apresenta os valores de precipitação diária no mês de dezembro de 2018, com destaque para os dias sem precipitação (em amarelo) e o dia representativo (em vermelho).

Os valores horários de ICU para o dia 27 de dezembro de 2018 estão apresentados Gráfico 37. A Figura 28 mostra a ICU estimada pelo modelo para toda a área de estudo em oito horários distintos (9, 12, 15, 18, 21, 0, 3 e 5 horas). O amanhecer do sol neste dia foi registrado às 05:03 h e os valores elevados de ICU registrados às 6 h são remanescentes da ICU do dia anterior.

O período da manhã concentrou os menores valores de ICU, os quais foram predominantemente negativos (ila de frescor) na maioria dos TH, com exceção do

TH06 que apresentou ICU de negativa a fraca, porém sem ultrapassar 1 °C. Os mapas da ICU (Figura 28; 9 e 12 h) também indicaram ilha de frescor predominante em todo o perímetro da cidade às 9 h e um gradual aumento das áreas de ICU fraca ao meio-dia.

Gráfico 36 – Acumulado diário de precipitação no mês de dezembro de 2018 em Recife. Fonte: INMET.



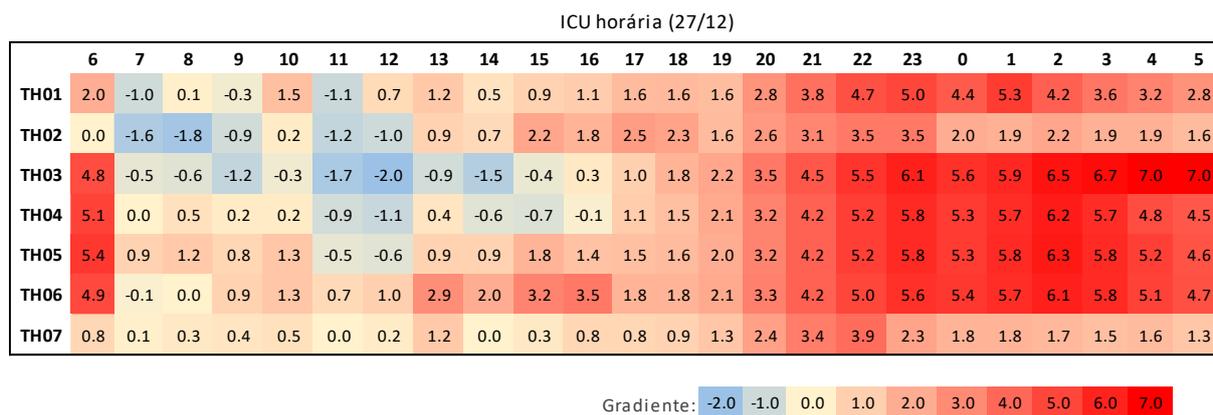
Fonte: A autora (2021).

A intensidade da ICU, apesar de ainda fraca, continuou crescente após o meio-dia na maioria dos TH. A exceção se encontrou nos TH01, TH03 e TH04, os quais tiveram ICU negativa/nula durante a maior parte da tarde. Apesar destes três TH apresentares características muito distintas entre si, a ICU estimada para as 15h

A Figura 28 mostra que as áreas próximas dos corpos hídricos e com maior cobertura vegetal apresentaram ICU mais reduzida neste horário. De modo que a maior parte da RPA 01 (no centro da cidade, onde o TH04 está localizado) apresentou ICU negativa.

O pôr-do-sol neste dia foi registrado às 17:38, os valores observados e espacializados às 18 h mostram que a ICU se apresentou principalmente nula ou fraca neste horário, porém logo em seguida, às 19 h, passou a registrar ICU acima de 2 °C nos TH do Grupo 2 e continuou se intensificando nas horas seguintes do período noturno em todos os TH.

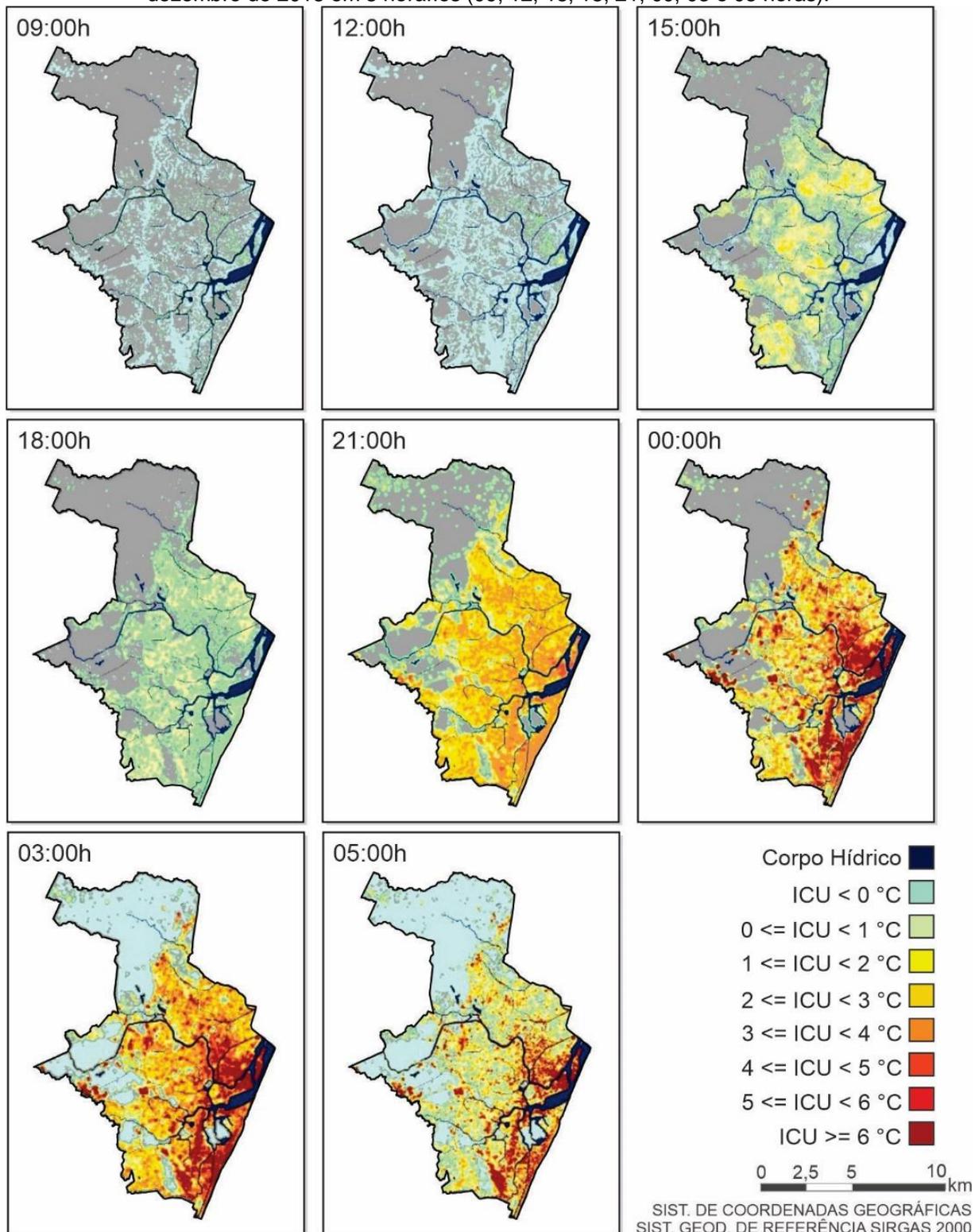
Gráfico 37 – Valores horários de ICU em cada TH durante o dia representativo seco (27 de dezembro de 2018).



Fonte: A autora (2021).

Os núcleos mais intensos de ICU, nas classes “forte” e “muito forte” foram registrados a partir da meia-noite na RPA 01 (centro), nos bairros da margem direita do Rio Capibaribe e nos bairros da orla marítima. A madrugada foi o período de maior intensidade da ICU e às 2 h ocorreu a maior quantidade de registros da classe “muito forte” nos TH. Por isto, este horário foi utilizado para o cálculo da intensidade máxima de ICU no período seco para cada bairro. Estes valores estão listados e expostos no mapa da Figura 29. Os bairros localizados no centro da cidade e o bairro de Boa Viagem concentraram os valores mais intensos de ICU máxima.

Figura 28 - Espacialização da ICU ao longo da área de estudo estimada pelo modelo no dia 27 de dezembro de 2018 em 8 horários (09, 12, 15, 18, 21, 00, 03 e 05 horas).



Fonte: A autora (2021).



estarem circundadas por este grupo de paisagem e apresentarem extensões espaciais menores em relação à superfície urbana de entorno.

O grupo de paisagem urbana representa o **perímetro construído** do Recife e possui uma área total de 147,09 Km<sup>2</sup>. Este grupo é onde os demais termohigrômetros foram localizados. A Tabela 12 lista a porcentagem de cada classe e subclasse de cobertura/estrutura da paisagem mapeadas no perímetro da paisagem urbana, este perímetro é composto 69% pela classe Superfície Edificada (SE). A classe Corpos Hídricos (CH) cobre 3% e a classe Cobertura Vegetal (CV) cobre 29% da superfície do perímetro construído.

Tabela 12 – Porcentagens das classes de cobertura/estrutura da paisagem no perímetro urbano de Recife.

| <b>CLASSE</b>             | <b>PORCENTAGEM DA COBERTURA</b> |
|---------------------------|---------------------------------|
| Superfície Edificada (SE) | 68%                             |
| SE Exposto                | 20%                             |
| SE Horizontal             | 36%                             |
| SE Média                  | 11%                             |
| SE Vertical               | 1%                              |
| Cobertura Vegetal (CV)    | 27%                             |
| CV Arbórea                | 15%                             |
| CV Arbustiva              | 4%                              |
| CV Rasteira               | 8%                              |
| Corpo Hídrico (CH)        | 5%                              |

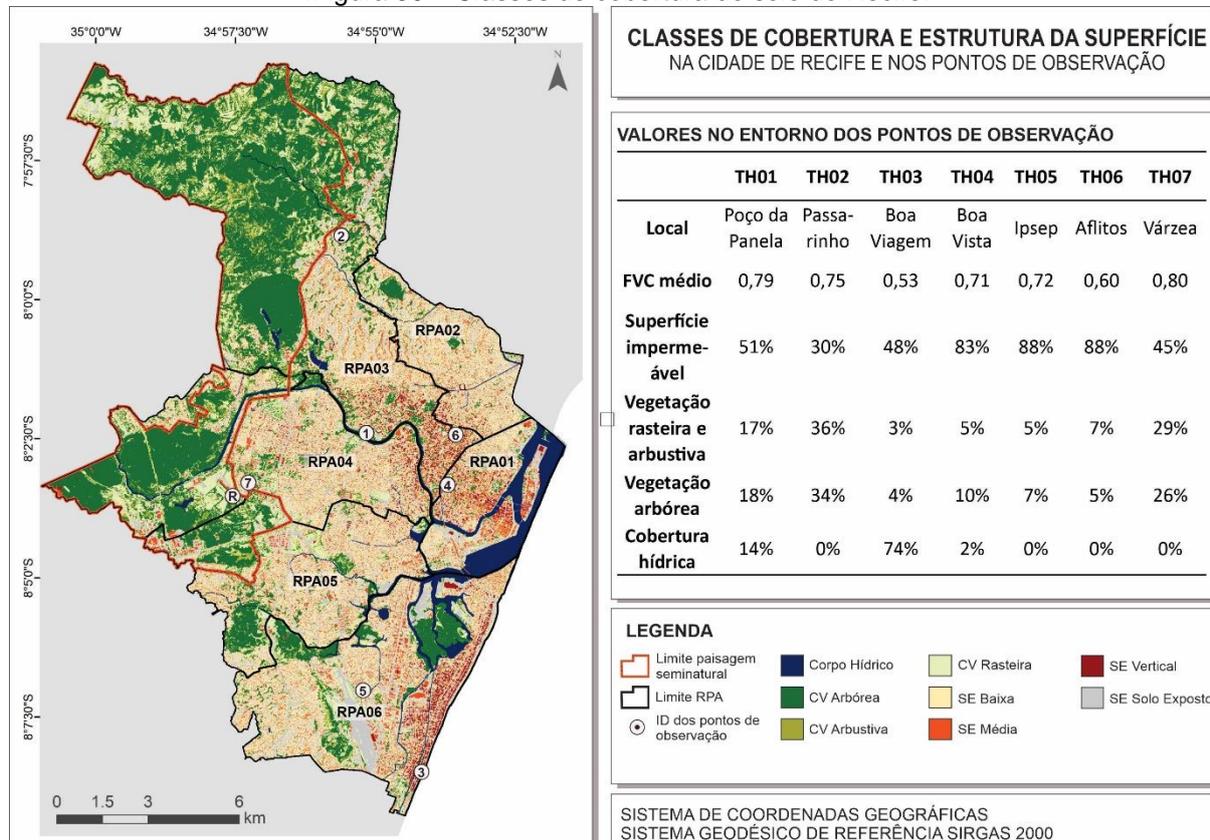
Fonte: A autora (2021).

O mapeamento destas classes, a delimitação dos grupos de paisagem seminatural, a localização dos termohigrômetros e os limites das RPA estão expostos na Figura 30. O mapeamento das classes de cobertura/estrutura da paisagem (Figura 30) expõe padrões espaciais de concentração e dispersão destas classes.

A classe SE representa melhor as transformações antrópicas responsáveis pela alteração do saldo de radiação na superfície. Quanto mais verticalizada for a estrutura da SE, mais intenso é o seu efeito sobre a ICU. As classes SE Vertical e SE Média correspondem a 12% do perímetro edificado. Esta porcentagem, apesar de aparentemente baixa, tem a característica de estar concentrada em áreas específicas

da cidade (como mostra a Figura 30), o que reflete na redução do Fator de Visão do Céu (FVC) destas áreas e na ICU resultante.

.Figura 30 – Classes de cobertura do solo do Recife.



Fonte: A autora (2021).

As demais classes também apresentam pontos de concentração ao longo do perímetro construído, por exemplo, a RPA 01 conteve a maior concentração de cobertura hídrica e a RPA 03 a maior concentração de cobertura vegetal, o que pode interferir positivamente na resposta térmica.

A AA identificou dois grupos distintos dentre os TH: os TH01, TH02 e TH07 corresponderam ao Grupo 1 e os demais ao Grupo 2. Quando observadas as porcentagens das variáveis da paisagem do entorno de cada TH (.Figura 30), as menores intensidade da ICU no Grupo 1 refletem o seu entorno, com os maiores valores de FVC, menores percentuais de superfície impermeabilizada e maiores percentuais de superfície vegetada.

O segundo grupo representou paisagens densamente urbanizadas, com os maiores percentuais de impermeabilização de superfície e menor quantidade de

vegetação. Por consequência, apresentam as maiores intensidades de ICU. A Tabela 13 lista as características gerais da ICU por TH.

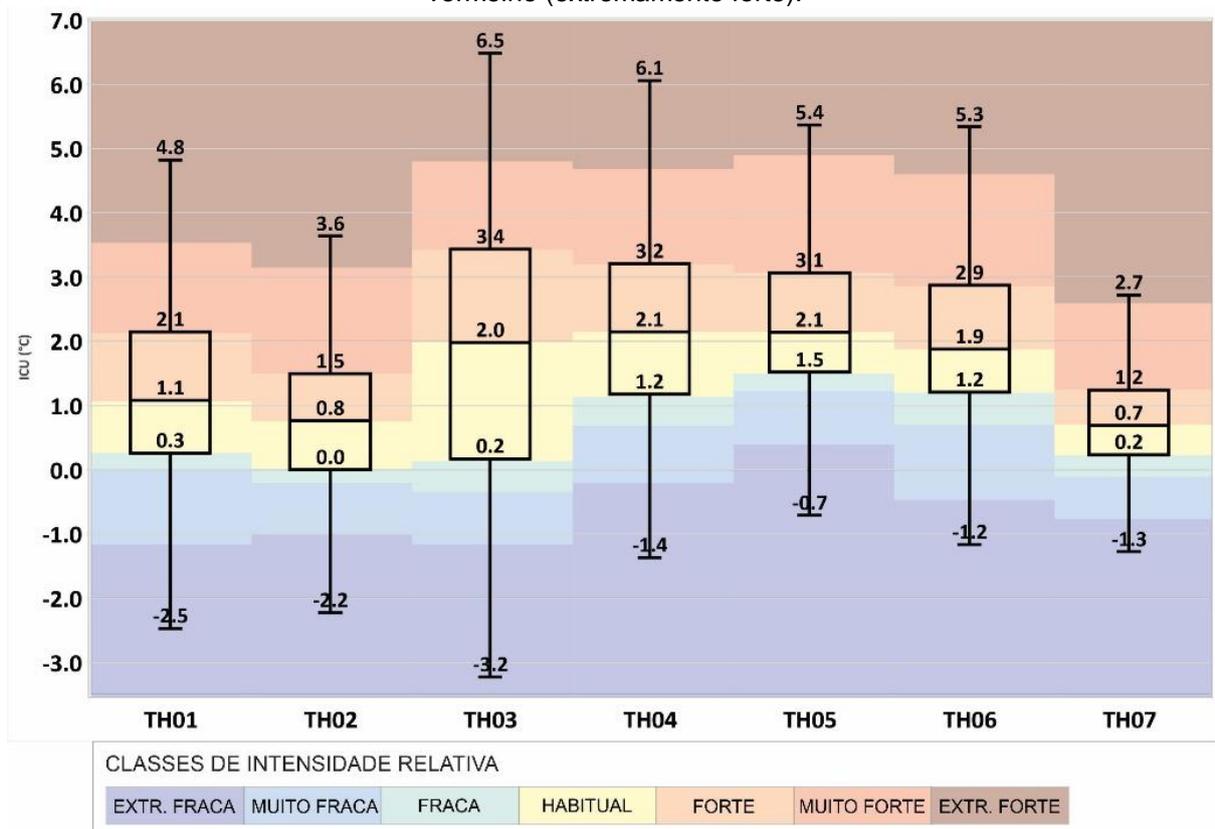
Tabela 13 – Características gerais das ICU registradas pelos TH.

|   | <b>TH01</b>          | <b>TH02</b>          | <b>TH03</b>                | <b>TH04</b>                      | <b>TH05</b>                   | <b>TH06</b>                   | <b>TH07</b>           |
|---|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Local   | Poço da<br>Panela    | Passarinh<br>o       | Boa<br>Viage<br>m          | Boa<br>Vista                     | Ipsep                         | Aflitos                       | Várze<br>a            |
| Grupo   | 1                    | 1                    | 2                          | 2                                | 2                             | 2                             | 1                     |
| Intensida<br>de média<br>da ICU                   | 1,0 °C               | 0,6 °C               | 1,3 °C                     | 1,7 °C                           | 2,0 °C                        | 1,8 °C                        | 0,7 °C                |
| Maior<br>intensida<br>de<br>mensal<br>da ICU      | 1,4 °C<br>(junho)    | 1,2 °C<br>(julho)    | 2,2 °C<br>(junho)          | 2,5 °C<br>(jun,<br>jul e<br>ago) | 2,8 °C<br>(agosto)            | 2,3 °C<br>(agosto)            | 1,0 °C<br>(junho<br>) |
| Maior<br>intensida<br>de<br>horária<br>da ICU     | 5,1 °C               | 3,7 °C               | 6,5 °C                     | 6,2 °C                           | 6,3 °C                        | 6,1 °C                        | 3,9 °C                |
| Período<br>de maior<br>intensida<br>de da<br>ICU  | de junho<br>a agosto | de junho a<br>agosto | de<br>junho<br>a<br>agosto | de<br>junho<br>a<br>agosto       | de junho<br>a<br>setembr<br>o | de julho<br>a<br>setembr<br>o | junho                 |
| Horários<br>de maior<br>intensida<br>de de<br>ICU | 20h – 5h             | 19h – 0h             | 17h –<br>05h               | 19h –<br>05h                     | 19h –<br>05h                  | 21h –<br>05h                  | 17h –<br>05h          |

Fonte: A autora (2021), baseado em Amorim & Dubreuil (2017).

A partir dos diagramas boxplot dos valores de ICU horária nos pontos observados (Gráfico 38) é possível identificar que o TH04 apresentou o maior valor médio de ICU (2,3 °C), seguido do TH 05 (2,2 °C) e do TH06 (2,0 °C). A menor média de ICU foi registrada pelo TH02 (0,8 °C). O TH03 se destacou tanto no maior (7,0 °C) quanto no menor (–3,2 °C) registros absolutos, de modo que este TH obteve a maior variabilidade horária de ICU. A menor dispersão foi registrada no TH07.

Gráfico 38 – Diagramas boxplot dos valores de ICU horária nos pontos observados e representação dos intervalos de intensidade relativa de ICU pelo seguinte gradiente: azul escuro (extremamente fraca), azul (muito fraca), azul claro (fraca), verde (habitual), amarelo (forte), laranja (muito forte) e vermelho (extremamente forte).



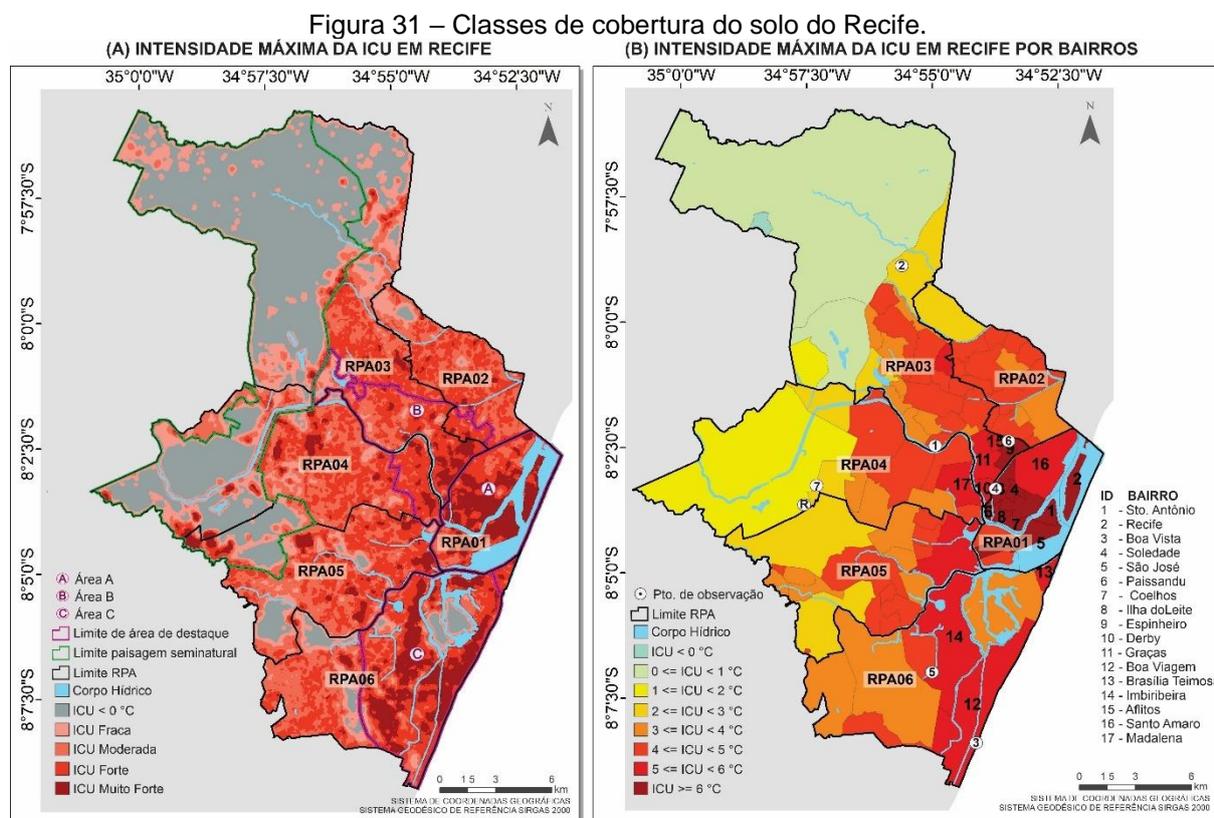
Fonte: A autora (2021).

Foi identificada uma elevada variabilidade da ICU por meio dos intervalos das classes de intensidade relativa nos TH (Gráfico 38). Por exemplo, a intensidade relativa de ICU “habitual” no TH07 corresponde à ICU “muito fraca” no TH06. As maiores intensidades e variabilidades de ICU foram identificadas no Grupo 2, sobretudo nos TH03 e TH04, localizados nos bairros de Boa Viagem e Boa Vista respectivamente.

A magnitude média mensal da ICU no Grupo 01 não ultrapassou 2°C ao longo do período do estudo, de modo que se classifica como “fraca” (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1996). Neste grupo, o TH01 apresentou as maiores variabilidades, sendo o mês de julho mais intenso. No Grupo 02, o mês de junho também apresentou as maiores intensidades de ICU, em conjunto com os meses de julho e agosto (exceto no TH06, com maiores intensidades entre julho e setembro). De forma geral, os meses chuvosos registraram ICU mais intensas em comparação aos demais.

A Figura 31 mostra a espacialização da  $ICU_{max}$  anual em Recife, a partir da média entre as  $ICU_{máx}$  dos dois dias representativos (Figura 27 e Figura 29, Cap. 4.2).

Os resultados apresentados mostraram que a ICU varia espacialmente, sazonalmente e ao longo das horas do dia na cidade do Recife. Os bairros com maiores  $ICU_{m\acute{a}x}$  est\~{a}o destacados e listados na Tabela 14. Esta figura tamb\~{e}m destaca tr\~{e}s \r{e}as (r{e}as A, B e C, contornadas em magenta no mapa) que se destacaram pelos elevados valores de  $ICU_{m\acute{a}x}$ .



Fonte: A autora (2021)

Tabela 14 – Lista dos bairros com maiores valores medios de  $ICU_{m\acute{a}x}$ .

| Cod | Bairro           | $ICU_{m\acute{a}x}$ | RPA   |
|-----|------------------|---------------------|-------|
| 1   | Santo Antnio    | 6,8                 | RPA01 |
| 2   | Recife           | 6,8                 | RPA01 |
| 3   | Boa Vista        | 6,8                 | RPA01 |
| 4   | Soledade         | 6,7                 | RPA01 |
| 5   | São José         | 6,6                 | RPA01 |
| 6   | Paissandu        | 6,6                 | RPA01 |
| 7   | Coelhos          | 6,5                 | RPA03 |
| 8   | Ilha do Leite    | 6,4                 | RPA01 |
| 9   | Espinheiro       | 6,2                 | RPA03 |
| 10  | Derby            | 5,9                 | RPA03 |
| 11  | Graças           | 5,8                 | RPA03 |
| 12  | Boa Viagem       | 5,7                 | RPA06 |
| 13  | Brasília Teimosa | 5,5                 | RPA06 |
| 14  | Imbiribeira      | 5,4                 | RPA06 |
| 15  | Aflitos          | 5,3                 | RPA03 |

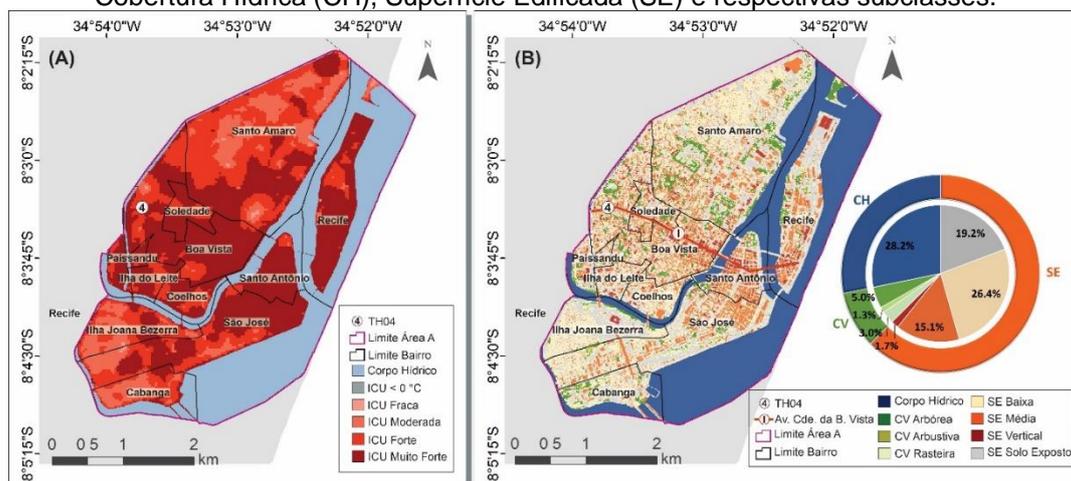
| Cod | Bairro      | ICUmáx | RPA   |
|-----|-------------|--------|-------|
| 16  | Santo Amaro | 5,2    | RPA01 |
| 17  | Madalena    | 5,2    | RPA04 |

Fonte: A autora (2021)

A maioria dos bairros listados na Tabela 14 pertencem à **Área A** (Figura 31), cujos limites coincidem com os da RPA01. Ela corresponde a um conjunto de ilhas situadas na confluência do Rio Capibaribe e do Rio Beberibe. Por este motivo, apresenta a maior concentração de cobertura hídrica da cidade (52% de toda a cobertura hídrica). Nesta RPA está localizado o centro histórico e comercial do Recife, refletindo em sua paisagem casarios antigos, pontes, parques, edifícios comerciais e residenciais dentre um grande fluxo de pessoas e automóveis.

A SE é à classe mais frequente de cobertura da superfície na RPA01, de toda a superfície edificada da cidade, a RPA01 concentra 19% da classe SE Vertical e 15% da SE Média. A Figura 32 mostra que estas duas classes estão concentradas principalmente no entorno da Avenida Conde da Boa vista, é nesta área que o TH04 está localizado.

Figura 32 – Bairros da RPA 01, localização do TH04, porcentagens de Cobertura Vegetal (CV), Cobertura Hídrica (CH), Superfície Edificada (SE) e respectivas subclasses.



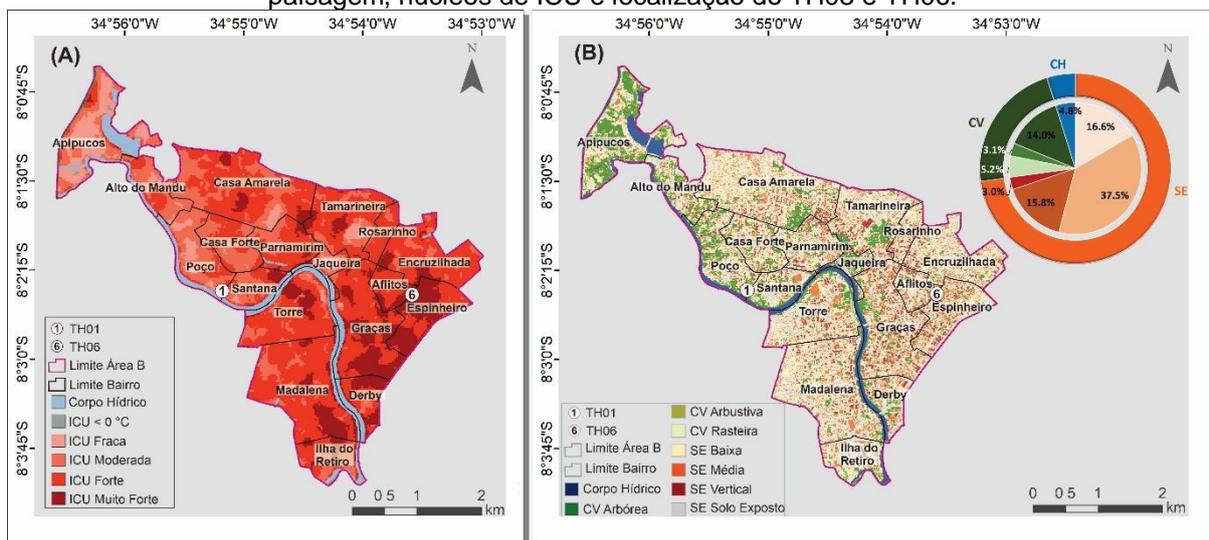
Fonte: A autora (2021).

Apenas 5% desta RPA é coberta por vegetação arbórea, muito reduzida e dispersa no entorno desta área, estando em maior parte nas margens dos rios, e nos bairros de Santo Amaro, São José e Cabanga. Apesar da pouca cobertura arbórea, esta concentração contribuiu para amenizar a ICU nesta área, porém sem ser suficiente para gerar ilha de frescor nos horários de maior intensidade de ICU.

Há uma redução na continuidade da  $ICU_{máx}$  no limite da RPA01 em direção aos bairros da RPA03, onde a maioria dos bairros da **Área B** (Figura 30) estão presentes, esta área também contém todos os bairros incluídos na Lei dos Doze Bairros. Percebe-se que enquanto a classe SE Vertical na Área B continua densamente concentrada, as áreas de magnitude de ICU nesta área se restringem a pontos isolados, incluindo onde o TH06 foi localizado. A Figura 33 detalha as classes de cobertura/estrutura da paisagem na Área B, as intensidades de  $ICU_{máx}$  e a localização dos TH01 e TH06.

Os valores resultantes de ICU encontrados nestes dois TH exemplificam a sua descontinuidade na Área B à medida que se aumenta a distância em relação à RPA01. As intensidades de ICU (Tabela 13) registradas pelo TH06 foram muito mais próximas às registradas pelo TH04, localizado na RPA01, do que do TH01. Esta descontinuidade se dá possivelmente tanto pela maior porcentagem de cobertura vegetal quanto pelas intervenções urbanísticas que limitam o gabarito das edificações e a paisagem histórica nos bairros desta RPA (apresentadas no Cap. 2.3).

Figura 33 – A Área B: Espacialização e porcentagem das classes de cobertura/estrutura da paisagem, núcleos de ICU e localização do TH03 e TH06.



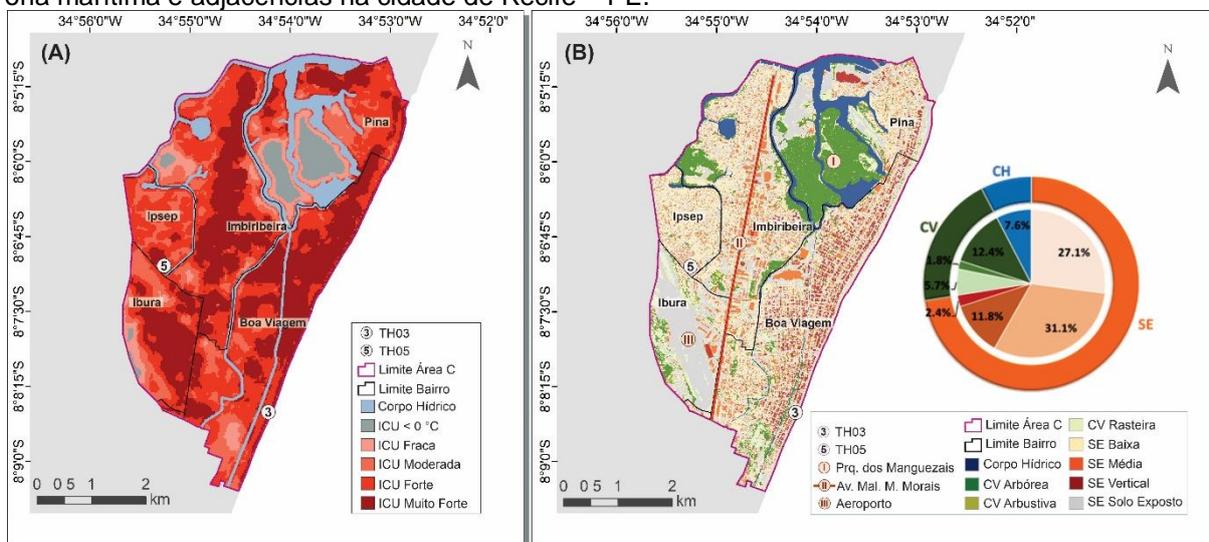
Fonte: A autora (2021).

A **Área C** corresponde aos bairros de Boa Viagem, Pina, Imbiribeira, Ipsep e parte do bairro do Ibura, pertencentes à RPA06. Esta RPA se destaca por possuir as maiores concentrações de SE Vertical e de SE Média: 43% e 26% respectivamente. Esta concentração é maior à medida que se aproxima da linha de costa, onde se localizam os bairros da Área C e o TH03, e atua como uma barreira física para a penetração dos ventos alísios na cidade. A Figura 34 mostra as classes de

cobertura/estrutura da paisagem na Área C, a espacialização da  $ICU_{máx}$  nesta área e a localização dos TH03 e TH05.

A influência da barreira de edifícios destes bairros sobre o clima urbano ainda não é totalmente compreendida, Moreira et al. (2021) discutem a distribuição do FVC em Recife, incluindo a influência da verticalização na orla marítima sobre a ICU. Os elevados edifícios presentes nos bairros de Boa Viagem e do Pina reduzem o FVC nestes locais e atuam como uma barreira para o fluxo do vento, predominantemente de sudeste, propiciando a intensificação de ICU nos bairros adjacentes. A elevada intensidade da ICU nos bairros da Imbiribeira e de Ipsep é um exemplo disto.

Figura 34 – À esquerda: Elementos de paisagem mapeados, identificação dos bairros e locais de destaque: Avenida Marechal Mascarenhas de Moraes (A), Pista do Aeroporto Internacional dos Guararapes (B) e Parque dos Manguezais (C). À direita: Fator de Visão do Céu (FVC) nos bairros da orla marítima e adjacências na cidade de Recife – PE.



Fonte: A autora (2021)

O Parque dos Manguezais (B) apresentou a menor intensidade de ICU na Área C, este parque pertence à ZAN Tejiipió. Somando-se à influência da barreira dos edifícios da orla marítima, percebe-se na Figura 34 que a Avenida Marechal Mascarenhas de Moraes (II), que corta o bairro da Imbiribeira em direção ao centro, cercado por uma área composta por edifícios comerciais e galpões, e a pista do aeroporto (III) se comportaram como núcleos de ICU intensa.

Teixeira e Quintas Neto (2018) abordam a desigualdade do acesso aos ventos marítimos nos bairros de Recife, relacionando à maior valorização imobiliária dos edifícios mais próximos da linha de costa. Esta desigualdade se reflete na resposta da ICU na Área C, pois apesar do TH03, localizado na linha de costa, ter apresentado

as maiores intensidades de ICU, a ilha de frescor diurna neste local foi bem definida ao longo do ano.

O TH05, posicionado a “sotavento” desta barreira de edifícios, apesar de não está localizada em uma paisagem densamente verticalizada, registrou ICU intensa, com média mensal superior ao TH03 e sem configuração de ilha de frescor.

As áreas de  $ICU_{máx}$  muito forte fora das três áreas destacadas, Figura 30, foram encontradas em áreas isoladas. Enquanto isto, áreas de magnitude forte de  $ICU_{máx}$  estiveram presente em todos os demais bairros do perímetro urbano, e apresentam um papel importante sobre a estimativa da vulnerabilidade socioespacial à ICU no Recife (discutida no Cap. 4.4).

Como toda a Macrozona de Ambiente Construído (MAC) já sofreu o processo ocupação extensiva, a verticalização se apresenta como a alternativa adotada para a expansão urbana no Recife. Além disto, o processo de atualização do Plano Diretor abre margem para intensificação deste processo.

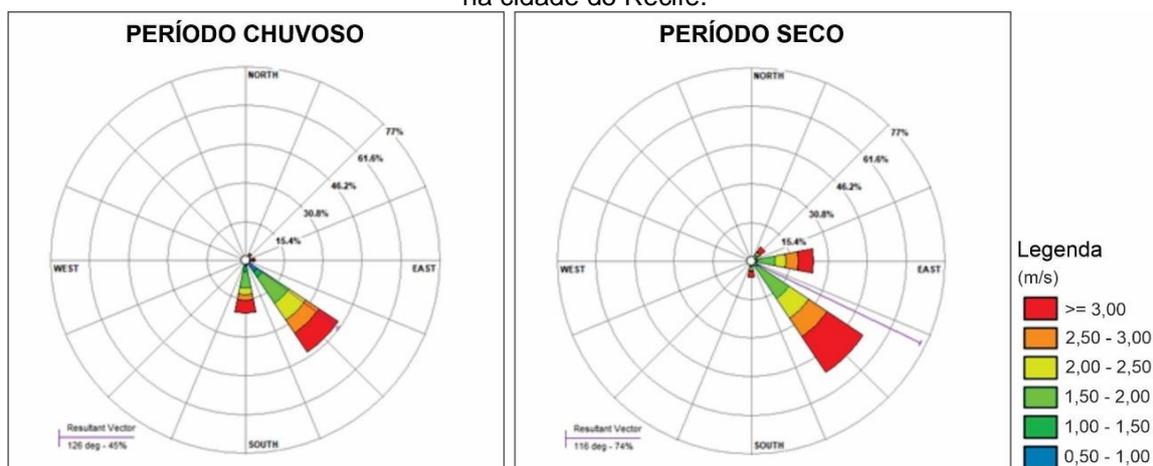
A variação sazonal da ICU mostrou que os meses chuvosos (de março a agosto) tiveram maior intensidade mensal de ICU em todos os TH. A princípio, estes resultados se apresentaram intrigantes, pois o período chuvoso tende a apresentar maior disponibilidade de umidade na atmosfera e, conseqüentemente, a reduzir a amplitude térmica. Por este motivo, muitos estudos encontram maior intensidade de ICU nos meses quentes e secos (WU; et al., 2019; JONGTANOM et al., 2011; AMORIM; DUBREUIL, 2017; ZHOU, 2018)

Questiona-se se este padrão se repete nas demais cidades tropicais litorâneas. Anjos e Lopes (2017) também identificaram maior intensidade de ICU no período chuvoso na cidade de Aracaju (SE), localizada no litoral nordestino assim como Recife. Estes autores atribuíram este comportamento sazonal da ICU em Aracajú à redução da velocidade do vento no período chuvoso desta cidade.

A Figura 35 apresenta o gráfico de rosa dos ventos de Recife para os dois períodos do estudo na  $E_{ref}$ . Estes gráficos mostram direção do vento predominante de sudeste, com maior intensidade no período seco, assim como Anjos e Lopes (2017) identificaram em Aracajú.

No período seco o vento também se apresentou mais constante, com menor frequência de calmarias, e com maior frequência da classe de velocidade do vento acima de 3,0 m/s. No período chuvoso a velocidade do vento foi reduzida, apresentando maior frequência da classe de 1,5 a 2,0 m/s.

Figura 35 – Gráficos de rosa dos ventos para o período chuvoso (esquerda) e período seco (direita) na cidade do Recife.



Fonte: A autora (2021). Dados provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia.

Apesar da ICU média mensal ser mais amena no período seco em Recife, este período não pode ser negligenciado. Medeiros (2018) mostra que os meses de agosto a dezembro apresentam a maior incidência de insolação nesta cidade. Além da maior insolação, o período seco também apresentou valores extremos de ICU superiores ao período chuvoso.

Por exemplo, o maior valor de ICU registrado no dia representativo seco foi de 7,0 °C (às 4 e 5 horas no TH03) enquanto no dia representativo do período chuvoso o maior valor de ICU foi de 6,2 °C (às 2 horas no TH03). Apesar das médias mensais de ICU serem inferiores nos meses secos, estes meses apresentam maior ocorrência de outliers.

O clima tropical litorâneo e úmido garante elevadas taxas de umidade durante todo o ano. As médias mensais de umidade relativa na cidade do Recife variaram apenas cerca de 10% ao longo do ano de 2018 (entre 85% em abril e 75% em dezembro). Em consequência da elevada umidade, a amplitude térmica anual é ainda menor do que a amplitude térmica diária.

As maiores intensidades de ICU encontradas no período chuvoso do Recife reflete a maior capacidade de resfriamento das áreas menos urbanizadas neste período. Por exemplo, a  $T_a$  média mensal entre os meses de março e julho no TH04 (Boa Vista), localizado no centro de Recife, reduziu 2,2 °C enquanto a  $E_{ref}$  reduziu 3,0 °C no mesmo período.

Além da identificação dos possíveis fatores que interferem na variabilidade sazonal da ICU no Recife, é importante estar atento às tendências climáticas em

diversas escalas que influenciam a sazonalidade nesta cidade e ao aumento da ICU em ambos os períodos.

Guedes e Silva (2020) alertam para uma tendência a redução persistente da umidade relativa do ar no Recife; maior tendência de aumento de período de estiagem, veranicos e ondas de calor mais intensas do que nas décadas anteriores; deslocamento positivo do aquecimento padrão da temperatura; e noites mais quentes, sobretudo durante a primavera.

Medeiros (2020) também aponta resultados similares aos de Guedes e Silva (2020) e adiciona que está ocorrendo um deslocamento dos meses chuvosos desta cidade; tendência negativa de intensidade do vento, tanto reais quanto previstas para daqui a 5 e 10 anos; madrugadas mais quentes; aumento da insolação; e redução significativa da umidade relativa tanto atuais quanto para daqui a 5 e 10 anos.

Os gráficos de intensidade relativa de ICU mostraram que as classes “extremamente fortes”, e conseqüentemente os dias representativos estudados, ocorreram principalmente em momentos de maior estiagem em ambos os períodos.

Estas tendências climáticas no Recife apontadas por Medeiros (2020) e por Guedes e Silva (2020) e listadas acima chamam atenção por propiciarem um cenário favorável para o aumento da frequência e da intensidade da ICU em Recife em ambos os períodos.

A configuração padrão da ICU descrita por Oke (1981) explica que a ICU é tipicamente mais fraca ou inexistente no período diurno mas cresce rapidamente a partir do pôr-do-sol, alcançando a máxima intensidade após 3 a 5 horas e reduzindo gradualmente no restante da noite. A variabilidade horária mostra que a ICU no Recife é predominantemente noturna, em geral, entre as 19h e 5h (Tabela 13).

Apesar da maior intensidade noturna, o comportamento diurno registrado pelos TH não pode ser ignorado: O TH05 (Ipsep), apresentou ICU diurna média de 2 °C às 12:00 da tarde no período chuvoso. O TH06 (Aflitos), também apresentou configuração diurna de ICU, registrando média de 2 °C às 14:00 do período seco. Em contrapartida, o TH03 (Boa Viagem) apresentou ilha de frescor bem definida entre 8h e 16h (período seco) e 9h e 14h (período chuvoso).

Portanto, a partir dos resultados obtidos é possível afirmar que em Recife ocorre ICU nos horários vespertinos, com magnitudes predominantes de fraca a moderada. As ilhas de frescor ocorrem principalmente nos horários matutinos. Comparando os resultados dos dias representativos, a ICU se desenvolveu mais

rapidamente no período chuvoso, apresentando núcleos bem definidos de magnitude de muito forte logo após o pôr-do-sol. No período seco, estes núcleos só se destacaram a partir da meia noite e o horário de maior intensidade da ICU na cidade é próximo às 2 horas da manhã.

O TH03, que apresentou maior ilha de frescor no período diurno, é localizado na linha de costa e 74% do seu entorno é composto por mar. Neste caso, o efeito da ilha de frescor se deve à proximidade deste TH em relação à linha costeira. Apesar da sua proximidade com o mar e de estar a “barlavento” do *canyon* urbano, este TH está instalado próximo a uma avenida de elevado fluxo e em um local com elevada quantidade de cobertura impermeabilizada (Parque Dona Lindu), ademais, a temperatura da superfície do mar é mais elevada no período noturno.

O conjunto destes fatores pode ser o responsável pela ICU intensa no período noturno no TH03 (com configuração similar e até mais intensa do que a registrada pelo TH04, localizado no centro) e à elevada variabilidade horária neste ponto.

A elevada variabilidade horária da ICU, com formação de ilhas de frescor diurna, em pontos localizados na linha de costa também foi discutida por Brito (2016) na cidade de Fortaleza/CE e por Anjos e Lopes (2017) na cidade de Aracajú, os quais atribuem as ilhas de frescor identificadas nos parques da cidade de Aracajú/SE, à variabilidade do vento. Apesar da proximidade com o mar possibilitar a formação de ilha de frescor diurna no TH03.

Além disto, Anjos et al., (2020) discutem a variabilidade espacial da precipitação no Recife, seus resultados mostraram que o bairro da Várzea, onde o TH07 está localizado e próximo à Eref, apresenta um acumulado pluviométrico anual de 365 mm a mais do que os bairros costeiros, onde o TH03 (Boa Viagem) está localizado. Esta menor disponibilidade pluviométrica nos bairros que apresentam maior cobertura impermeabilizada pode influenciar na distribuição da umidade, no aumento de energia convertida em calor sensível, no balanço de energia na superfície e, conseqüentemente, na ICU.

Khan et al (2021) afirmam que muitos autores têm reportado que cidades úmidas e tropicais apresentam mais ilhas de frescor do que de calor durante os dias de verão pré-moção, esta constatação foi baseada em estudos elaborados em áreas urbanas asiáticas. Apesar da elevada quantidade de estudos de ICU nas áreas urbanas ao longo do mundo, a América do Sul ainda é sub-representada (KHAN et al ,2021), o que dificulta o confronto dos dados. Mesmo assim, no Brasil estes

estudos estão ganhando força, sobretudo nas últimas décadas (AMORIM, 2020; AMORIM e DUBREUIL, 2017; ANJOS *et al.*, 2017; ANJOS e LOPES, 2017; GOMES *et al.*, 2017; ROCHA *et al.*, 2020).

Estes resultados alertam quanto à necessidade de delinear com mais clareza a influência da maritimidade sobre a ICU das áreas urbanas litorâneas de modo a encontrar meios para potencializar o efeito da ilha de frescor nestes ambientes.

#### 4.4 A VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL À ICU NA CIDADE DO RECIFE

A dimensão social desta análise correspondeu ao Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), calculado por Análise Fatorial (AF). Foram gerados 6 fatores, dos quais cinco apresentaram variância acumulada equivalente a 68,3% (superior à linha de corte de 65%), como mostra a Tabela 15, os quais foram extraídos para IVS. O Quadro 11 lista os fatores selecionados, suas cargas fatoriais e respectivas variáveis demográficas e a Figura 36 apresenta a distribuição espacial destes fatores por setor censitário.

Tabela 15 – Variância total explicada dos fatores calculados para o IVS.

| <b>Fator</b> | <b>Total</b> | <b>Variância (%)</b> | <b>Var. acum. (%)</b> |
|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| 1            | 0,308        | 33,231               | 33,231                |
| 2            | 3,395        | 13,581               | 46,812                |
| 3            | 2,216        | 8,863                | 55,675                |
| 4            | 1,806        | 7,222                | 62,897                |
| 5            | 1,356        | 5,423                | <b>68,319</b>         |
| 6            | 1,028        | 4,114                | 72,433                |

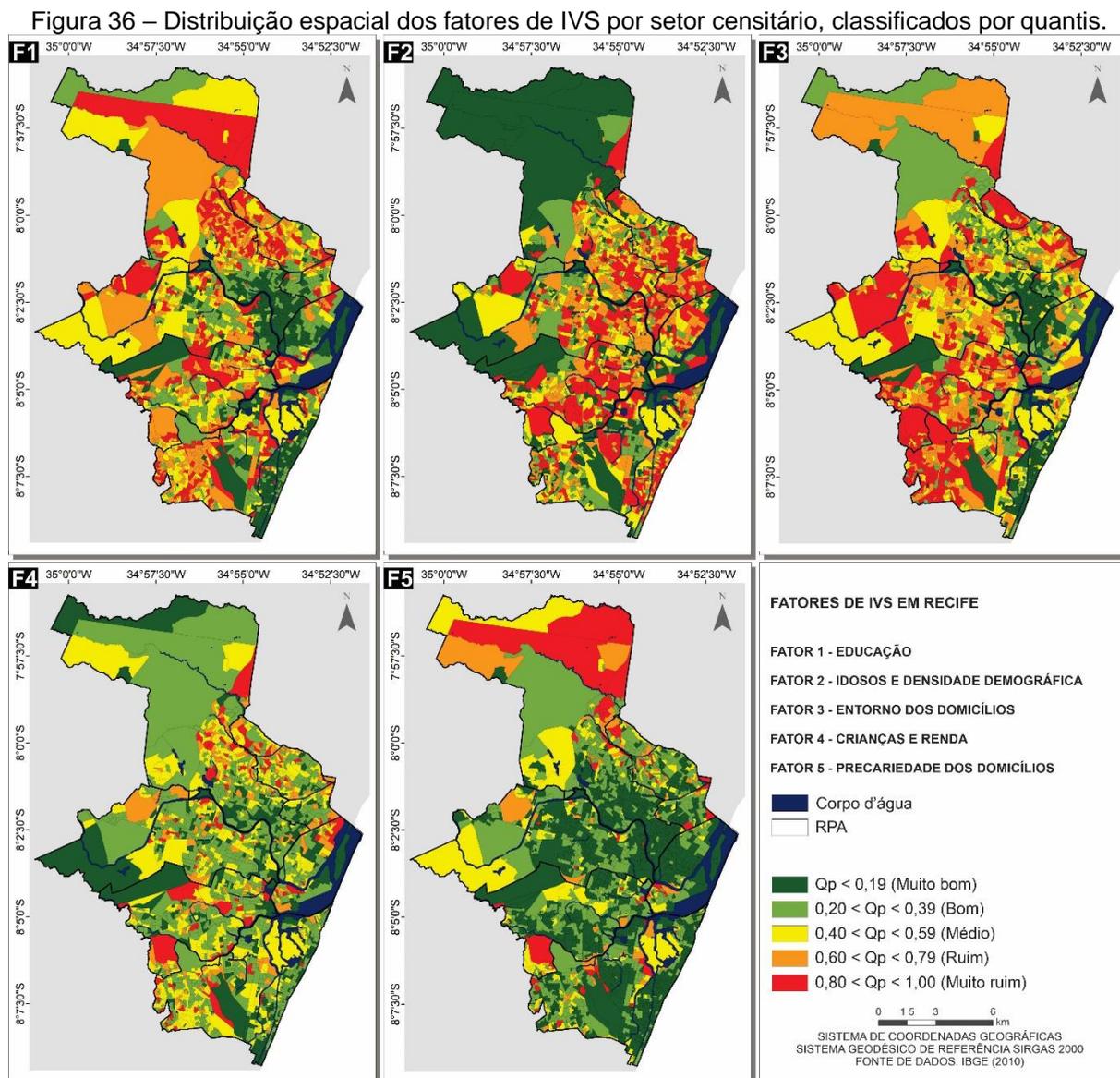
Fonte: Autoria própria.

Quadro 11 – Relação dos fatores e das variáveis demográficas selecionadas pela AF com suas respectivas cargas.

|   |             |
|---|-------------|
| <b>FATOR 1 (F1) – Educação</b>  | <b>0.88</b> |
| Responsáveis por domicílios particulares permanentes não alfabetizados                      | 0.94        |
| Idosos responsáveis por domicílios particulares permanentes não alfabetizados               | 0.93        |
| Mulheres não alfabetizadas responsáveis por domicílios particulares permanentes.            | 0.94        |
| <b>FATOR 2 (F2) – Idosos e densidade demográfica</b>  | <b>0.96</b> |
| Idosos responsáveis por domicílios particulares permanentes                                 | 0.98        |
| Idosos  | 0.98        |
| Mulheres responsáveis por domicílios particulares permanentes com mais de 60 anos de idade. | 0.94        |
| Densidade Demográfica   | 0.64        |

|   |             |
|---|-------------|
| <b>FATOR 3 (F3) – Precariedade do entorno</b>   | <b>0.64</b> |
| Responsável por domicílio particular permanente com rendimento nominal mensal de até 3 salários-mínimos | 0.37        |
| Domicílios sem arborização  | 0.81        |
| Domicílios particulares permanentes sem pavimentação, sem calçada e sem meio fio/guia                   | 0.85        |
| Domicílios particulares permanentes com esgoto a céu aberto   | 0.82        |
| <b>FATOR 4 (F4) – Crianças e Renda</b>  | <b>0.60</b> |
| Crianças responsáveis por domicílios particulares permanentes   | 0.86        |
| Responsáveis por domicílios particulares permanentes sem rendimento nominal mensal                      | 0.64        |
| Mulheres responsáveis por domicílios particulares permanentes com 10 a 19 anos de idade.                | 0.89        |
| Pobreza extrema   | 0.34        |
| <b>FATOR 5 (F5) – Precariedade do domicílio</b>   | <b>0.95</b> |
| Crianças não alfabetizadas  | 0.47        |
| Domicílios particulares permanentes com lixo não coletado   | 0.74        |
| Domicílios particulares permanentes precários   | 0.73        |

Fonte: A autora (2021).



Fonte: A autora (2021).

O tema de cada fator foi atribuído de acordo com o nome das suas variáveis, por exemplo, o Fator 1 (F1) possui predominantemente variáveis relacionadas à educação (Quadro 11) e explica 33,2% da variância total da série (Tabela 15). O F1 (Educação) é o principal fator que explica a vulnerabilidade social em Recife, apontando domicílios que apresentam responsáveis não-alfabetizados, incluindo idosos e o gênero feminino. Além do F1, a educação também esteve presente no F5, o qual agrupou variáveis relativas à precariedade dos domicílios à presença de crianças não-alfabetizadas.

A presença dos idosos(as) nos domicílios teve maior destaque no F2, em conjunto com a densidade demográfica. A Figura 36 mostra os valores deste fator apresentou muita concentração das classes em bairros ou áreas específicas, como

os demais. Além disto, este foi o fator que atingiu mais fortemente as áreas mais valorizadas da cidade, como os bairros da orla marítima, do centro e da margem esquerda do Rio Capibaribe.

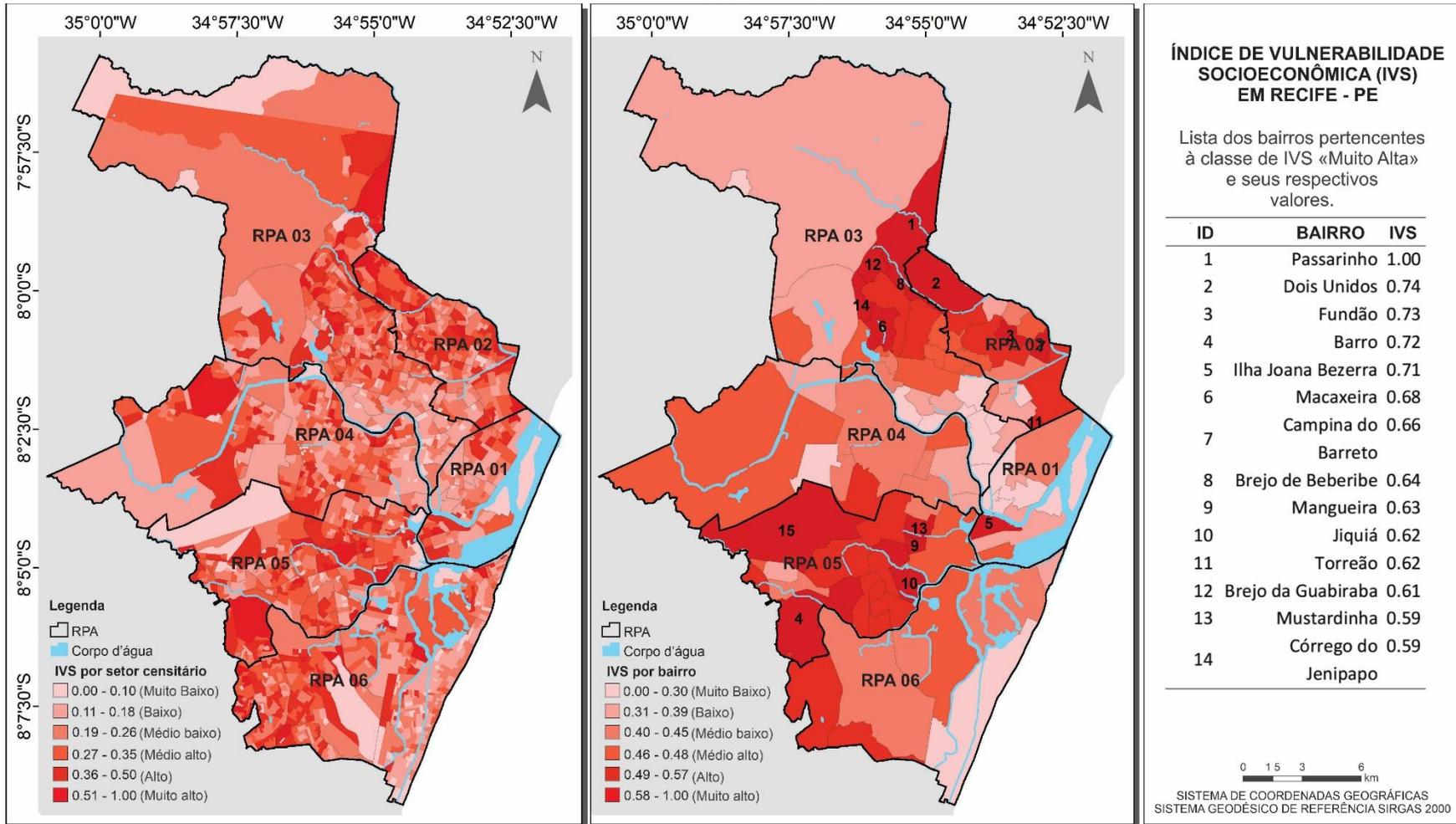
O F3 uniu variáveis relativas à precariedade do entorno do domicílio e a baixa renda dos seus responsáveis. Os locais de pobreza extrema são apontados no F4 em conjunto com locais onde crianças se encontram em condição de vulnerabilidade e sem rendimento.

O IVS, sintetizando as componentes “sensibilidade” e “capacidade de adaptação”, resultou do score do cálculo da média ponderadas destes fatores, os scores variaram de 0 a 1: quanto mais próximos de 1, maior a vulnerabilidade. A distribuição espacial do IVS está exposta na Figura 37. O bairro de Passarinho possuiu o maior IVS (1,0), seguido pelos bairros de Dois Unidos (0,74), Fundão (0,73), Barro (0,72) e Ilha Joana Bezerra (0,71).

A distribuição do IVS por setor censitário resultou em uma malha heterogênea e com elevada variância intra-bairro, de modo que são identificados setores censitários com valores elevados de IVS mesmo em bairros menos vulneráveis.

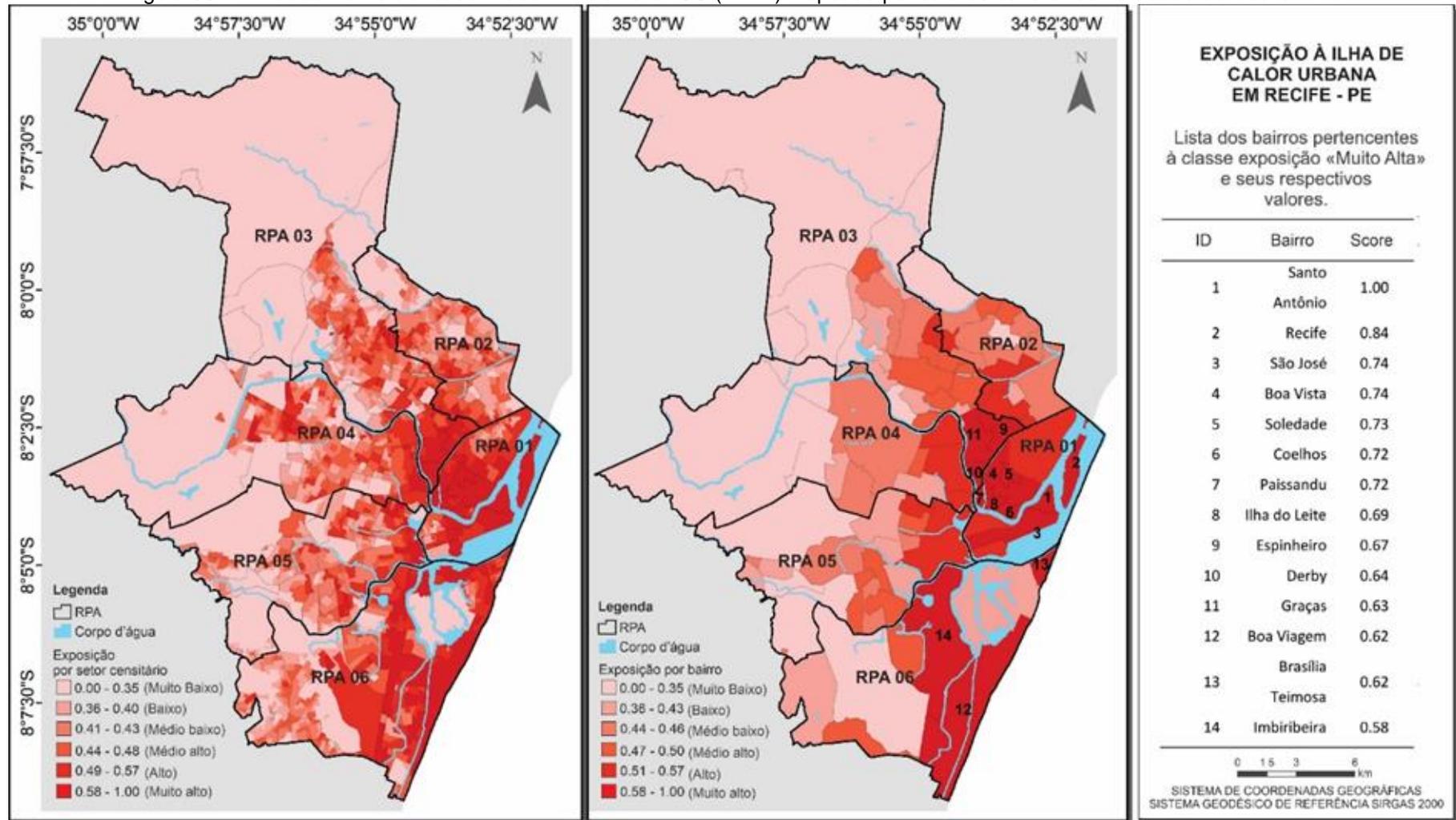
A terceira componente, “exposição”, é resultante da média das  $ICU_{máx}$  dos períodos seco e chuvoso (Cap.4.2). A sua distribuição, por setores censitários e por bairros, está apresentada pela Figura 38. A variabilidade intra-bairro da exposição foi menor, em comparação com a do IVS, com os maiores valores concentrados nos bairros próximos ao centro e à orla marítima.

Figura 37 – Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) mapeado por setores censitários na cidade do Recife – PE, com destaque para os bairros da classe de IVS “Muito Alta”.



Fonte: A autora (2021)

Figura 38 – Índice de Vulnerabilidade Físico–Ambiental à ICU (IVFAI) mapeado por setores censitários na cidade do Recife – PE



Fonte: A autora (2021)

A lista dos bairros que apresentaram classe de exposição “Muito Alta” também está apresentada na Figura 38. Os bairros que obtiveram os maiores scores de exposição foram Santo Antônio (1,00), Recife (0,84) e São José (0,74), todos localizados na região central da cidade. Os capítulos anteriores apresentaram os resultados da análise de ICU em Recife e discutiram detalhadamente como ela interage com a cidade. O mapa de exposição (Figura 38) reforça esta discussão.

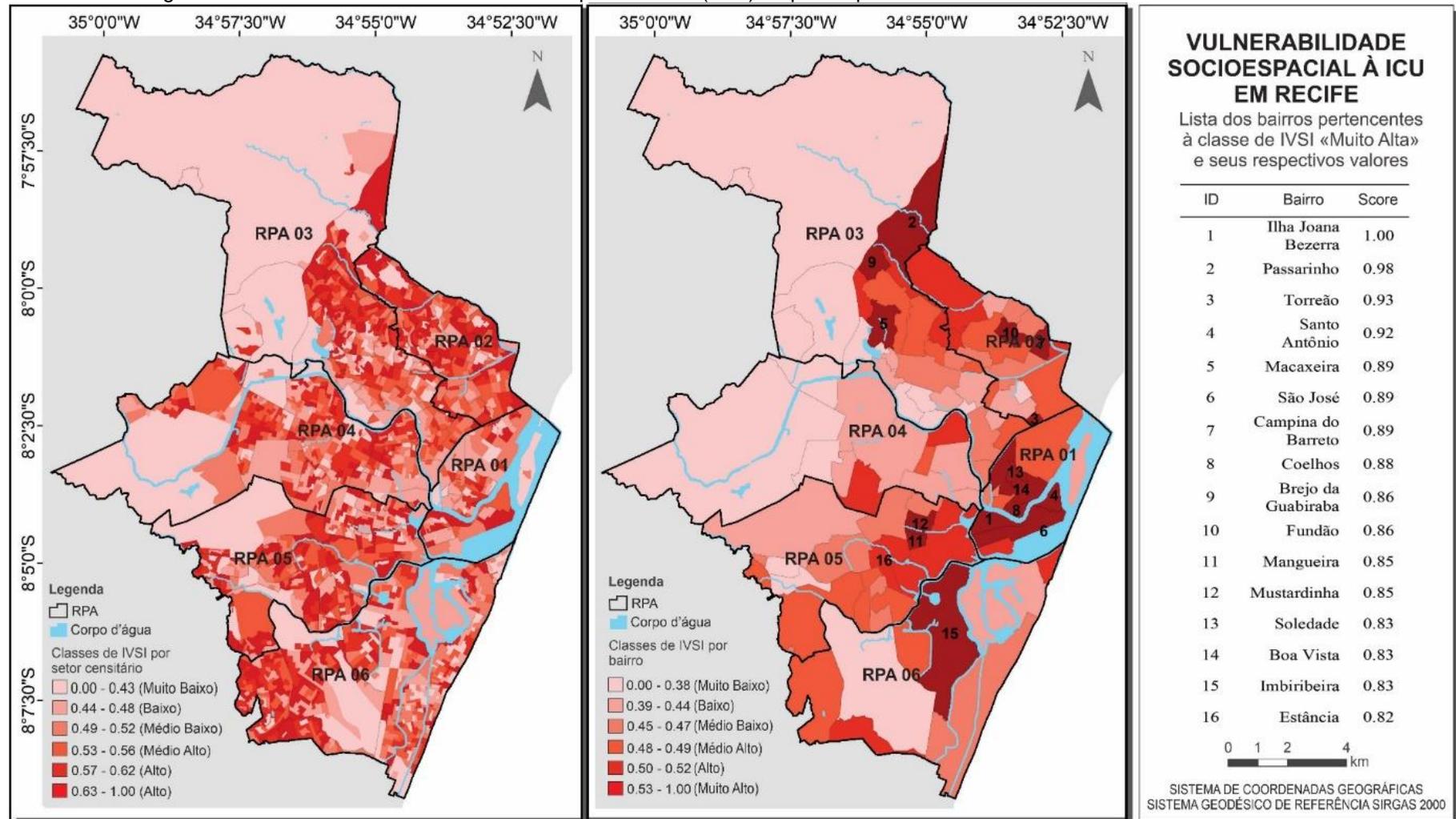
O Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à ICU (IVSI) foi resultante da média ponderada da exposição e do IVS. A Tabela 16 lista os bairros com os maiores deste índice, correspondentes à classe de IVSI “muito alta”. e a Figura 39 mostra a sua distribuição espacial por setores censitários e por bairros.

Tabela 16 – Lista dos bairros correspondentes à classe de IVSI muito alta e respectivos scores de exposição, IVS e seus fatores.

| <b>BAIRRO</b>      | <b>IVSI</b> | <b>IVFAI</b> | <b>IVS</b> | <b>F1</b> | <b>F2</b> | <b>F3</b> | <b>F4</b> | <b>F5</b> |
|--------------------|-------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ilha Joana Bezerra | 1,00        | 0,54         | 0,71       | 0,97      | 0,42      | 0,24      | 1,00      | 0,40      |
| Passarinho         | 0,98        | 0,23         | 1,00       | 1,00      | 0,56      | 1,00      | 0,53      | 0,88      |
| Torreão            | 0,93        | 0,54         | 0,62       | 0,10      | 0,92      | 0,17      | 0,45      | 0,63      |
| Santo Antônio      | 0,92        | 1,00         | 0,15       | 0,01      | 0,29      | 0,21      | 0,01      | 0,01      |
| Macaxeira          | 0,89        | 0,43         | 0,68       | 0,66      | 0,69      | 0,57      | 0,67      | 0,18      |
| São José           | 0,89        | 0,74         | 0,37       | 0,32      | 0,58      | 0,26      | 0,13      | 0,09      |
| Campina do Barreto | 0,89        | 0,46         | 0,66       | 0,74      | 0,75      | 0,59      | 0,26      | 0,20      |
| Coelhos            | 0,88        | 0,72         | 0,38       | 0,60      | 0,34      | 0,12      | 0,31      | 0,17      |
| Brejo da Guabiraba | 0,86        | 0,47         | 0,61       | 0,97      | 0,53      | 0,36      | 0,42      | 0,19      |
| Fundão             | 0,86        | 0,35         | 0,73       | 0,75      | 1,00      | 0,60      | 0,32      | 0,11      |
| Mangueira          | 0,85        | 0,44         | 0,63       | 0,70      | 0,66      | 0,68      | 0,28      | 0,12      |
| Mustardinha        | 0,85        | 0,47         | 0,59       | 0,54      | 0,80      | 0,58      | 0,26      | 0,09      |
| Soledade           | 0,83        | 0,73         | 0,31       | 0,06      | 0,61      | 0,17      | 0,28      | 0,03      |
| Boa Vista          | 0,83        | 0,74         | 0,30       | 0,06      | 0,65      | 0,15      | 0,20      | 0,02      |
| Imbiribeira        | 0,83        | 0,58         | 0,45       | 0,44      | 0,56      | 0,32      | 0,26      | 0,16      |
| Estância           | 0,82        | 0,47         | 0,56       | 0,59      | 0,72      | 0,49      | 0,22      | 0,12      |

Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Índice de Vulnerabilidade Socioespacial à ICU (IVSI) mapeado por setores censitários na cidade do Recife – PE.



Fonte: A autora (2021)

A Tabela 16 além de apresentar os valores de cada índice, também mostra os valores dos fatores de IVS destes bairros. A elevada variabilidade intra-bairro dos valores de IVS por setor censitário se refletiu nos resultados do IVSI, porém a distribuição espacial dos bairros com os maiores valores de IVSI foi concentrada na região central e nos morros da zona norte.

O bairro da Ilha de Joana Bezerra, com o maior score de IVSI, combinou elevados valores de vulnerabilidade tanto na dimensão social quanto física. Apresentando scores de IVFAI classificado como “alto” (0,54) e de IVS como “Muito Alto” (0,71). Estes valores mostram que a dimensão social ainda teve um maior peso no resultado.

Ao observar os fatores sociais que contribuíram para este resultado, este bairro obteve o maior score no F4 (1,0), assim como um elevado score no Fator 1. Isto mostra que o bairro da Ilha de Joana Bezerra possui uma elevada concentração de setores censitários que combinam condições elevadas de pobreza extrema, vulnerabilidade infantil e analfabetização em um ambiente suscetível à ICU intensa.

O bairro de Passarinho ficou com o segundo maior score de IVSI (0,98). Isto se deu porque este bairro teve o maior score de IVS, apresentando valores elevados em todos os fatores (ainda com os maiores valores do F1 e do F3). Este bairro foi citado nos capítulos anteriores deste estudo por ter sido o local de instalação do TH02, representando um bairro residencial de porte horizontal, com elevada taxa de arborização e localizado no limite com o grupo de paisagem seminatural, onde a  $E_{ref}$  está localizada.

Os resultados da ICU no bairro de Passarinho, apresentados e discutidos nos capítulos anteriores, mostraram que este bairro teve intensidade de ICU muito baixa nas escalas horária e sazonal. Isto se refletiu no seu baixo score de exposição (0,23), classificado como “Muito Baixo”.

Junto com o bairro de Passarinho, os bairros de Brejo da Guabiraba, Macaxeira, Fundão, Campina do Barreto, Mustardinha, Estância e Mangueira, compõem o grupo dos bairros em que os fatores sociais apresentaram um peso maior na IVSI resultante.

A elevada vulnerabilidade social destes bairros é sobretudo quanto à capacidade de adaptação, de modo que um pequeno acréscimo na intensidade da ICU, traz um forte impacto na população residente.

Os valores dos fatores sociais nestes bairros, apresentados pela Tabela 16, explica a dificuldade destes bairros frente ao desenvolvimento da resiliência adequada. A maioria deles apresentou simultaneamente valores elevados no F2, o qual combina a presença de idosos(as) com elevada densidade demográfica e no F4, que combina a presença de crianças vulneráveis e pobreza extrema.

Tanto a população idosa quanto a infantil são apontadas pela Organização Mundial de Saúde (OMS) no grupo das pessoas mais vulneráveis ao estresse térmico (BERRY *et al.*, 2013). Além disto, a precariedade registrada tanto dentro quanto no entorno dos domicílios, em conjunto com as temperaturas mais elevadas decorrentes da ICU, indica um favorecimento para a formação de um ambiente insalubre que propicia a ocorrência de enfermidades e a disseminação de epidemias, sobretudo nos grupos de pessoas mais vulneráveis.

Os bairros de Santo Antônio, São José, Coelho, Soledade e Boa Vista compõem o grupo de bairros com IVSI muito alto localizados na região central. Apesar de não apresentarem vulnerabilidade social elevada, como os citados anteriormente, estes bairros se localizam no principal núcleo de ICU da cidade.

Como citado, estes bairros não apresentaram elevado IVS, contudo, ao observar os fatores na Tabela 16, a combinação da presença de idosos com a densidade demográfica em alguns destes bairros também é elevada (F2: Boa Vista, Soledade e São José). A população idosa nestes bairros, apesar de não se encontrar em condição de insalubridade como no grupo anterior, também se apresenta em condição vulnerabilidade devido à elevada exposição.

O bairro da Imbiribeira, penúltimo na lista da Tabela 16, obteve IVSI elevado por apresentar exposição de classe “Muito Alto” (0,58) e IVS de classe “Médio Baixo” (0,45). Neste bairro a dimensão física da vulnerabilidade também pesou mais na componente exposição.

A intensidade da ICU neste bairro foi mencionada no capítulo anterior (Cap. 4.3) durante a discussão sobre a ICU na Área C, composta pelos bairros de Boa Viagem, Pina, Imbiribeira, Ipsep e parte do bairro do Ibura.

Dentre os bairros contidos na Área C, Boa Viagem e Imbiribeira fazem parte dos bairros que apresentaram classe de exposição “Muito Alto” (Figura 39).

A presença do Parque dos Manguezais no bairro do Pina amenizou os valores de ICU<sub>máx</sub> neste bairro e conseqüentemente o seu score de exposição. Apesar do bairro de Boa Viagem ter tido valor de exposição superior ao do bairro da Imbiribeira

(0,62 e 0,58 respectivamente), o elevado padrão econômico da maior parte da população de Boa Viagem, refletiu nos reduzidos scores de IVS e de IVSI.

O bairro de Boa Viagem concentra a maior taxa de verticalização da cidade e reduzido FVC, de modo que seus edifícios, de elevado valor econômico e localizados na orla marítima, atuam como uma barreira para a penetração dos ventos alísios, predominantemente de leste e de sudeste, nos bairros adjacentes (MOREIRA, A. B. *et al.*, 2021).

A Imbiribeira, como vizinho imediato à oeste de Boa Viagem, não concentra superfície verticalizada, porém continua inserido no núcleo da ICU da Área C, com elevado score de IVS (principalmente devido à combinação da presença de idosos e densidade demográfica) e, conseqüentemente possui a maior vulnerabilidade à ICU da Área C.

Este resultado reforça a discussão levantada por Teixeira e Quintas Neto (2018) sobre a restrição do acesso aos ventos marítimos devido à valorização imobiliária no Bairro de Boa Viagem e como isto pode refletir no clima urbano. Estes autores mencionam que os ventos marítimos são privatizados neste bairro.

Apesar do presente estudo não concordar que exista privatização dos ventos marítimos em Boa Viagem, como afirma Teixeira e Quintas Neto (2018), pois não há consonância com a Lei 9.491 de 1997 que define o processo de privatização, constata-se que os edifícios do bairro de Boa Viagem encontram-se em condições de privilégio econômico e social ao mesmo tempo em que interferem negativamente no clima urbano da cidade.

Os resultados mostraram que as medidas de mitigação à ICU na cidade do Recife devem se adequar às condições tanto físicas quanto sociais. O bairro de Passarinho, por exemplo, apontado na análise de ICU como uma área de pouca exposição não possui capacidade de adaptação suficiente para enfrentar qualquer aumento de intensidade de ICU.

No caso dos bairros que se encontram como o Passarinho (como Brejo da Guabiraba, Macaxeira, Fundão, Campina do Barreto, Mustardinha, Estância e Mangueira), é importante investir em medidas que fortaleçam os fatores sociais e reduzam a insalubridade ambiental.

Enquanto isto, os bairros centrais precisam investir em alternativas que amenizem diretamente a formação da ICU, como o aumento da arborização tanto nas vias públicas quanto em residências e parques, redução do tráfego de veículos

particulares, aumento da superfície permeável e redução do processo de verticalização.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A compreensão da ICU nas cidades tropicais demanda uma complexidade de fatores do que nas cidades europeias e da América do Norte (onde os estudos de ICU foram iniciados), pois o desenvolvimento destas cidades ocorreu de formas distintas. O desenho urbano das cidades tropicais costuma seguir formas geométricas mais orgânicas, decorrentes da falta (ou ineficiência) do planejamento público durante o processo de expansão urbana.

A paisagem urbana resultante destas cidades reflete desigualdades físicas, sociais e culturais que tanto produzem quanto interagem com o clima urbano. Estas desigualdades são difíceis de se enquadrar em sistemas de classificação de paisagem para estudos de ICU.

O presente estudo enfrentou dificuldades na obtenção de dados observados de temperatura do ar devido à pouca quantidade de termohigrômetros disponíveis e à impossibilidade de realizar transectos móveis durante o período de isolamento social, contudo foi possível estimar satisfatoriamente a distribuição espacial da ICU.

As duas primeiras questões levantadas neste estudo (“O que favorece a formação da ICU na cidade do Recife?; e “Como ocorrem as variabilidades temporal e espacial da ICU ao longo da sua malha urbana? ”) foram respondidas pela discussão acerca da paisagem urbana e da ICU resultante (Cap. 4.4).

Foi identificado que os núcleos mais intensos de ICU na cidade de Recife coincidem com as áreas mais verticalizadas da cidade. Particularidades foram levantadas, como a interferência da verticalização nos bairros da orla marítima sobre a ICU resultante nos bairros adjacentes. Além disto, toda a malha urbana da cidade de apresentou submetida aos efeitos da ICU.

Apesar da ICU ser um fenômeno principalmente noturno, o estudo identificou a sua ocorrência nos horários vespertinos, com magnitudes predominantes de fraca a moderada. As ilhas de frescor ocorrem principalmente nos horários matutinos. Sazonalmente, o período chuvoso apresentou ICU mais intensas. Apesar disto período seco chama atenção por apresentar a maior incidência de insolação.

As discussões levantadas corroboraram a hipótese de que o impacto da ICU na cidade do Recife envolve fatores sociais e físicos da paisagem urbana. A última questão levantada pelo estudo (“Como a ICU impacta a população desta cidade?”) foi respondida pela discussão da análise de vulnerabilidade socioespacial à ICU (Cap.

4.5). Esta análise constatou que há bairros em Recife que mesmo sob baixa intensidade de ICU apresentam elevada vulnerabilidade ao seu impacto, pois se encontram sob elevada vulnerabilidade social.

Para estes bairros, as medidas de mitigação devem ser voltadas aos fatores sociais e à redução da insalubridade no interior e no entorno dos domicílios. Enquanto isto, os bairros centrais precisam investir em alternativas que amenizem diretamente a formação da ICU, como o aumento da arborização tanto nas vias públicas quanto em residências e parques, redução do tráfego de veículos particulares, aumento da superfície permeável e redução do processo de verticalização.

O presente estudo encoraja as pesquisas futuras a procurarem formas de refinar a modelagem espacial da ICU a partir da obtenção de uma rede maior de pontos de coletas de dados climáticos. Estudos futuros também podem fazer uso dos resultados obtidos na análise de vulnerabilidade, e avançar na construção de estratégias de mitigação ao impacto da ICU sobre a cidade.

Do ponto de vista regional, também seria interessante se o procedimento realizado neste estudo fosse replicado para as demais capitais localizadas no litoral oriental da Região Nordeste do Brasil. Além destas cidades compartilharem de similaridades nos processos históricos de formação do espaço urbano, elas também estão sob um domínio climático particular a esta estreita faixa litorânea. Expandir este estudo nestas cidades permite fortalecer a compreensão e a representatividade dos estudos de ICU e do seu impacto sobre a população desta região.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. Q. **Vulnerabilidades socioambientais de rios urbanos : bacia hidrográfica do rio Maranguapinho, região metropolitana de Fortaleza, Ceará.** [S.l.]: 2010. 279 p. Tese (doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de Calor Urbanas: Métodos e Técnicas de Análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2019. v. 18, n. edição especial, p. 361–376. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v0i0.65136>>.
- \_\_\_\_\_. Daily evolution of urban heat islands in a Brazilian tropical continental climate during dry and rainy periods. **Urban Climate**, dez. 2020. v. 34, n. July, p. 100715. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100715>>.
- \_\_\_\_\_; DUBREUIL, Vincent. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. **Climate**, 3 dez. 2017. v. 5, n. 4, p. 91. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2225-1154/5/4/91>>.
- ANDRADE, H. O Clima Urbano - Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Revista Portuguesa de Geografia (Finisterra)**, 2005. v. 40, n. 80, p. 67–91. Disponível em: <<https://doi.org/10.18055/Finis1479>>.
- ANJOS, M. *et al.* Rede Climatológica De Mesoescala Aplicada Ao Estudo Da Ilha De Calor Urbano: O Caso De Aracaju-SE. **Caminhos de Geografia**, 2017. v. 18, n. 62, p. 203–216.
- \_\_\_\_\_; LOPES, A. Urban Heat Island and Park Cool Island intensities in the coastal city of Aracaju, North-Eastern Brazil. **Sustainability**, 2017. v. 9, n. 8, p. 1379. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su9081379>>.
- ANJOS, R. S.; WANDERLEY, L. S. De A.; NÓBREGA, R. S. Análise espacial da precipitação e possíveis fatores que contribuem para sua espacialização em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 29 fev. 2020. v. 13, n. 1, p. 018. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/242040>>.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 2003. v. 23, n. 1, p. 1–26. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.859>>.
- BERRY, P. *et al.* **Protecting Health from Climate Change: Vulnerability and Adaptation Assessment**. 1. ed. Geneva: World Health Organization, 2013.
- BHATTACHARJEE, S. *et al.* Assessment of Different Methodologies for Mapping Urban Heat Vulnerability for Milan, Italy. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 21 jun. 2019. v. 290, n. 1, p. 012162. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/290/1/012162>>.

BIRKMANN, J. Danger need not spell disaster but how vulnerable are we? **United Nations University**, 2005. n. 1, p. 1–8.

\_\_\_\_\_. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. **Environmental Hazards**, 2007. v. 7, n. 1, p. 20–31. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002>>.

BITTENCOURT, S. M. **Interação térmica entre edifícios inseridos na malha urbana verticalizada do bairro de Boa Viagem na cidade do Recife – PE**. [S.l.]: 2006. 245 p. Dissertação ( Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BRITO, L. S. D. O. **Estudo de Ilha de Calor na Região Metropolitana de Fortaleza utilizando o modelo WRF**. [S.l.]: 2016. 90 p. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2016.

BROWN, C.; SHAKER, R. R.; DAS, R. A review of approaches for monitoring and evaluation of urban climate resilience initiatives. **Environment, Development and Sustainability**, 1 fev. 2018. v. 20, n. 1, p. 23–40. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10668-016-9891-7>>.

CAROLIS, L. DE. **The Urban Heat Island Effect in Windsor, ON: An Assessment of Vulnerability and Mitigation Strategies**. Windsor/ON: [s.n.], 2012. Disponível em: <[http://www.citywindsor.ca/residents/environment/environmental-master-plan/documents/urban heat island report \(2012\).pdf](http://www.citywindsor.ca/residents/environment/environmental-master-plan/documents/urban%20heat%20island%20report%20(2012).pdf)>.

CERVENY, R. Noah Webster: Lexicographer, Climatologist. **Weatherwise**, 2009. v. 62, n. 4, p. 38–43. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3200/WEWI.62.4.38-43>>. CHOW, W. T. L.; CHUANG, W.-C.; GOBER, P. Vulnerability to Extreme Heat in Metropolitan Phoenix: Spatial, Temporal, and Demographic Dimensions. **The Professional Geographer**, maio. 2012. v. 64, n. 2, p. 286–302. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00330124.2011.600225>>.

CIDADE, L. C. F. Urbanização, ambiente, risco e vulnerabilidade: em busca de uma construção interdisciplinar. **Urbanização, ambiente, risco e vulnerabilidade: em busca de uma construção interdisciplinar**, 2013. v. 15, n. 29, p. 171–191. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=402837816008>>.

COSEO, P.; LARSEN, L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. **Landscape and Urban Planning**, 2014. v. 125, p. 117–129. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.019>>.

CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. **Progress in Human Geography**, 1 dez. 1996. v. 20, n. 4, p. 529–539. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913259602000407>>.

\_\_\_\_\_; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social Vulnerability to Environmental Hazards \*. **Social Science Quarterly**, jun. 2003. v. 84, n. 2, p. 242–261. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1540-6237.8402002>>.

DIRKSEN, M. *et al.* Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. **Urban Climate**, dez. 2019. v. 30, n. February, p. 100498. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>>.

DUBREUIL, Vincent; MONTGOBERT, M.; PLANCHON, O. Une méthode d'interpolation des températures de l'air en Bretagne : combinaison des paramètres géographiques et des mesures infrarouge NOAA - AVHRR. **Hommes et Terres du Nord**, 2002. v. 1, n. 1, p. 26–39. Disponível em: <[https://www.persee.fr/doc/htn\\_0018-439x\\_2002\\_num\\_1\\_1\\_2795](https://www.persee.fr/doc/htn_0018-439x_2002_num_1_1_2795)>.

DUTRA JR., P. **Vulnerabilidade socioambiental ao desconforto termico em Ituiutaba (MG)**. [S.l.]: 2016. 170 p. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, 2016.

ELLEN, I. G. *et al.* Planning for an Uncertain Future. **Journal of Planning Education and Research**, 7 set. 2016. v. 36, n. 3, p. 349–362. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0739456X16659911>>.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. **Manual de Climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación**. 1. ed. Madrid: Espacios Y Sociedades, 1996. V. 2.

\_\_\_\_\_. Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. **Investigaciones Geográficas**, 15 set. 2009. v. 49, n. 49, p. 173. Disponível em: <<https://www.investigacionesgeograficas.com/article/view/2009-n49-ciudad-y-cambio-climatico-aspectos-generales-y-aplicacion-al-area-metropolitana-de-madrid>>.

FERREIRA, H. Dos S. **Clima urbano e dengue no Recife: influência climática sobre a formação das epidemias**. [S.l.]: 2016. 121 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

FIALHO, E. S. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte : Caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira**. [S.l.]: 2009. 279 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FOISSARD, X.; DUBREUIL, V.; QUÉNOL, H. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). **Urban Climate**, set. 2019. v. 29, n. March 2018, p. 100490. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095518300877>>.

FOISSARD, Xavier. **L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise**. [S.l.]: 2016. 248 p. Tese (Doutorado). Géographie, Université Rennes 2, Rennes, 2016. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01381999>>.

FREITAS, R. F. M. De *et al.* Mapa climático como instrumento para o planejamento urbano. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, 2021. v. 23, p. 1–31.  
GAGO, E. J. *et al.* The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate

adverse effects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, set. 2013. v. 25, p. 749–758. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057>>.

GAMBLE, J. *et al.* Mapping the Vulnerability of Human Health to Extreme Heat in the US. 2018.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Texto, 2010.

GOMES, P. S. **Ocupação do solo e microclimas urbanos: o caso de Montes Claros - MG**. [S.l.]: 2008. 213 p. Dissertação (Mestrado); Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

GOMES, W. P.; AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, Vincent. Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, 22 dez. 2017. v. 34, p. 82. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/133193>>.

\_\_\_\_\_; AMORIM, M. C. De C. T.; DUBREUIL, Vincent. Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil. **Geography Department University of Sao Paulo**, 22 dez. 2017. v. 34, p. 82. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/133193>>.

GUEDES, R. V. De S.; SILVA, T. L. Do V. Análise Descritiva da Precipitação, Temperatura, Umidade e Tendências Climáticas no Recife - Pe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11 dez. 2020. v. 13, n. 07, p. 3234. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/246169>>.

HÄMMERLE, M. *et al.* Different aspects in the quantification of the Sky View Factor in complex environments. **Acta Climatologica et Chorologica**, 2014. v. 47–48, n. July, p. 53–62. Disponível em: <<https://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/2014-Acta-Clim-chor-47-48-Hammerle-et-al.pdf>>.

HOOKE, J.; DUVEILLER, G.; CESCATTI, A. A global dataset of air temperature derived from satellite remote sensing and weather stations. **Scientific Data**, 6 dez. 2018. v. 5, n. 1, p. 180246. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/sdata2018246>>.

IBGE. Downloads | IBGE. 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

ICAZA, L. E.; DOBBELSTEEN, A. VAN DEN; HOEVEN, F. VAN DER. Integrating urban heat assessment in urban plans. **Sustainability (Switzerland)**, 2016. v. 8, n. 4.

JAUREGUI, E. The human climate of tropical cities: an overview. **International Journal of Biometeorology**, 1991. v. 35, n. 3, p. 151–160. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF01049061>>.

JOHNSON, D. P.; WILSON, J. S. The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: The case of heat-related deaths in Philadelphia. **Applied Geography**, 2009. v. 29, n. 3, p. 419–434. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.11.004>>.

JONGTANOM, Y.; KOSITANONT, C.; BAULERT, S. Temporal Variations of Urban Heat Island Intensity in Three Major Cities, Thailand. **Modern Applied Science**, 29 set. 2011. v. 5, n. 5, p. 105–110. Disponível em: <<http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/11148>>.

KHAN, A.; CHATTERJEE, S.; WENG, Y. Context and background of urban heat island. **Urban Heat Island Modeling for Tropical Climates**. [S.l.]: Elsevier, 2021a, p. 1–35.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. Future research for tropical UHI. **Urban Heat Island Modeling for Tropical Climates**. [S.l.]: Elsevier, 2021b, p. 215–230.

KILBOURNE, E. M. Heat Waves and Hot Environments. **Weather-Related Problems**. [S.l.]: [s.n.], 1997, p. 245–69.

KOTHARKAR, R.; RAMESH, A.; BAGADE, A. Urban Heat Island studies in South Asia: A critical review. **Urban Climate**, jun. 2018. v. 24, n. December 2017, p. 1011–1026. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.006>>.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009.

LEAL FILHO, W. *et al.* Coping with the impacts of urban heat islands. A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context. **Journal of Cleaner Production**, jan. 2018. v. 171, n. November, p. 1140–1149. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617323806>>.

LOWRY, W. P. Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis. **Journal of Applied Meteorology**, fev. 1977. v. 16, n. 2, p. 129–135. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/jamc/article/16/2/129/350039/Empirical-Estimation-of-Urban-Effects-on-Climat-A>>.

LUBER, G.; MCGEEHIN, M. Climate Change and Extreme Heat Events. **American Journal of Preventive Medicine**, nov. 2008. v. 35, n. 5, p. 429–435. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0749379708006867>>.

MACKILLOP, F. **A compact history of urban climatology & planning**. Manchester, UK.: [s.n.], 2011. Disponível em: <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00566194>>.

MALCZEWSKI, J. **GIS and Multicriteria Decision Analysis**. 1. ed. Ontario: John Wiley & Sons, 1999. V. 1.

MANIK, T.; SYAUKAT, S. Comparative Vulnerability Assessment of Urban Heat Islands in Two Tropical Cities in Indonesia. **British Journal of Environment and**

**Climate Change**, 10 jan. 2017. v. 7, n. 2, p. 119–134. Disponível em:  
<<http://www.sciencedomain.org/abstract/19841>>.

MANIK TUMIAR KATARINA; SYAUKAT SYARIFAH. The impact of urban heat islands: assessing vulnerability in Indonesia | Publications Library. **Human Settlements Working Paper**, 2015. Disponível em:  
<<https://pubs.iied.org/10721iied>>.

MARDLE, S. J. **Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods**. [S.l.]: [s.n.], 2002. V. 53.

MEDEIROS, R. M. Insolação decadal para o município de Recife - PE, Brasil. **Revista Geográfica Acadêmica**, 2018. v. 12, n. 2, p. 124–137. Disponível em:  
<<https://revista.ufrr.br/rga/article/view/5269>>.

\_\_\_\_\_. Impactos e variabilidade no clima urbano de Recife - PE (Brasil). **OKARA: Geografia em debate**, 7 maio. 2020. p. 21–40. Disponível em:  
<<https://periodicos.ufpb.br/index.php/okara/article/view/43687>>.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2007.

MILLS, Gerald. Urban climatology: History, status and prospects. **Urban Climate**, dez. 2014. v. 10, n. P3, p. 479–489. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>>.

MIRZAEI, P. A. Recent challenges in modeling of urban heat island. **Sustainable Cities and Society**, dez. 2015. v. 19, p. 200–206. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>>.

MITCHELL, B. C. **A landscape of thermal inequity : social vulnerability to urban heat in US Cities**. [S.l.]: 2017. 170 p. Tese (Doutorado). School of Geosciences, University of South Florida, 2017.

MOREIRA, A. B. O Maior dos Loucos. **Indagações e outras poesias**. Documento ed. Recife: Fundação Biblioteca Nacional, 2017, p. 21.

\_\_\_\_\_. *et al.* Eventos extremos e a cidade: estudo de caso dos impactos causados por um evento climático em área urbana. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2017. v. 10, n. 6, p. 1730–1745. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p1730-1745>>.

\_\_\_\_\_. *et al.* O Fator de Visão do Céu e o clima urbano na cidade do Recife - PE/ Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2021. v. 28, p. 28–47. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.71518>>.

MOREIRA, E. B. M. **Variação espacial e multitemporal das temperaturas da superfície na cidade do Recife**. [S.l.]: 2009. 97 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

\_\_\_\_\_. **Balanco de Energia e Evapotranspiração na cidade do Recife-PE por Sensoriamento Remoto**. [S.l.]: 2014. 155 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

\_\_\_\_\_; NÓBREGA, R. S.; SILVA, B. B. Influência da expansão urbana em Recife (PE) no fluxo de calor sensível através de imagens digitais do TM Landsat 5. **Revista de Geografia (UFPE)**, 2013. v. 30, n. 2, p. 153–168. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229100>>.

NIU, Y. *et al.* A Systematic Review of the Development and Validation of the Heat Vulnerability Index: Major Factors, Methods, and Spatial Units. **Current Climate Change Reports**, 27 abr. 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s40641-021-00173-3>>.

NÓBREGA, R. S.; VITAL, Luis Augusto De Bakker. Influência da Urbanização sobre o Microclima de Recife e Formação de Ilha de Calor (Influence of Urbanization on the Climate of Recife and Development of Heat Island). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 9 nov. 2010. v. 3, n. 3, p. 151. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbge/index.php/revista/article/viewArticle/131>>.

NUNES, A. F. **O Impacto Da “Lei Dos Doze Bairros” Sobre a Construção Civil Na Cidade Do Recife**. [S.l.]: 2008. 162 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, Univercidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

\_\_\_\_\_. **Intervenções normativas localizadas em sistemas urbanos . Estudo de aplicação da “ Lei dos Doze Bairros ” na cidade do Recife . Intervenções normativas localizadas em sistemas urbanos . Estudo de aplicação da “ Lei dos Doze Bairros ” na cidade do Recife**. [S.l.]: 2017. 292 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós- Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, jul. 1981. v. 1, n. 3, p. 237–254. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.3370010304>>.

\_\_\_\_\_. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, jan. 1982. v. 108, n. 455, p. 1–24. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49710845502>>.

\_\_\_\_\_. Towards better scientific communication in urban climate. **Theoretical and Applied Climatology**, 27 fev. 2006. v. 84, n. 1–3, p. 179–190. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00704-005-0153-0>>.

\_\_\_\_\_. *et al.* Urban Heat Island. **Urban Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017, p. 197–237.

PONTUAL, V. Tempos do Recife: representações culturais e configurações urbanas. **Revista Brasileira de História**, 2001. v. 21, n. 42, p. 417–434. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-)

01882001000300008&lng=pt&tlng=pt>.

RASUL, A. *et al.* A Review on Remote Sensing of Urban Heat and Cool Islands. **Land**, 9 jun. 2017. v. 6, n. 2, p. 38. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2073-445X/6/2/38>>.

RECIFE. **Análise de Riscos e Vulnerabilidades Climáticas e Estratégia de Adaptação do Município do Recife - PE. Resumo para tomadores de decisão.** Recife: [s.n.], 2019.

REN, C.; NG, E. Y. Y.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: A review. **International Journal of Climatology**, dez. 2011. v. 31, n. 15, p. 2213–2233. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2237>>.

RIZWAN, A. M.; DENNIS, L. Y. C.; LIU, C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, jan. 2008. v. 20, n. 1, p. 120–128. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074208600194>>.

ROCHA, G. S. Da; DUBREUIL, Vincent; MENDONÇA, F. De A. A ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA E A ILHA DE CALOR URBANA NA ÁREA CONURBADA DE FLORIANÓPOLIS-SC. 2020. v. 27, n. 16, p. 900–918.

ROCHA, J. F. M. O conceito de “campo” em sala de aula: uma abordagem histórico-conceitual. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, abr. 2009. v. 31, n. 1, p. 1604.1-1604.17. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172009000100013&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172009000100013&lng=pt&tlng=pt)>.

SANTOS, A. S. De A. **Modelos de ocupação territorial e legislação urbanística: o caso do Recife.** [S.l.]: 2017. 107 p. Dissertação (Mestrado), Centro de Artes e Comunicação, Universidade Federal de Pernambuco, 2014. ISBN 9788578110796.

SANTOS, P. F. C. *et al.* Conforto térmico e diferentes tipos de tempo meteorológico na cidade do Recife (PE). **ENTRE-LUGAR**, 13 dez. 2017. v. 8, n. 16, p. 12–31. Disponível em: <<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/entre-lugar/article/view/6269>>.

\_\_\_\_\_. **MICROCLIMAS URBANOS NA CIDADE DO RECIFE-PE: proposta de zoneamento sob o enfoque do conforto térmico.** [S.l.]: 2018. 150 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SANTOS, T. O. **Identificação de ilhas de calor em Recife-PE por meio de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície.** [S.l.]: 2011. 90 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SILVA, D. Da M. E. **Empinando Pipa.** São Paulo: Itaú Cultural de Arte e Cultura Brasileira, 2021.

SILVA, L. H. Da. **A verticalização do espaço urbano : O caso do bairro do Prado**

– Recife / PE. [S.l.]: 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. De; ARAÚJO, L. E. De. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11 out. 2012. v. 5, n. 2, p. 250. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232788>>.

STEWART, I. D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. **International Journal of Climatology**, fev. 2011. v. 31, n. 2, p. 200–217. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2141>>.

\_\_\_\_\_. Why should urban heat island researchers study history? **Urban Climate**, dez. 2019. v. 30, n. April, p. 100484. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>>.

\_\_\_\_\_; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1 dez. 2012. v. 93, n. 12, p. 1879–1900. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>>.

TATE, E. Social vulnerability indices: A comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. **Natural Hazards**, 2012. v. 63, n. 2, p. 325–347.

TEIXEIRA, A. F. D. M.; QUINTAS NETO, A. P. Privatização do acesso aos ventos marítimos: O caso do bairro Boa Viagem - Recife/PE. **Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais**, 2018. v. 7, n. 1, p. 142–157. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistamseu/article/view/237715>>.

UNGER, Janos. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. **International Journal of Environment and Pollution**, 2009. v. 36, n. 1/2/3, p. 59. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=21817>>.

VITAL, Luís Augusto De Bakker; MOREIRA, E. B. M.; NÓBREGA, R. S. Estimativa De Índice De Desconforto Humano Em Um Transecto No Município De Olinda / Pe. **Geonorte**, 2012. v. 2, n. 5, p. 761–772. Disponível em: <<https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2535>>.

WANDERLEY, L. S. A. *et al.* As chuvas na cidade do Recife: Uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, 21 fev. 2018. v. 22, p. 149–164. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/56034>>.

\_\_\_\_\_. *et al.* Weather types associated with daily intense rainfall events in the city of Recife - PE, Brazil. **Sociedade e Natureza**, 2021. p. 1–14.

WANDERLEY, M. De N. B. A ruralidade no Brasil moderno. Por um pacto social pelo desenvolvimento rural. **¿Una nueva ruralidad en América Latina?** Buenos Aires: CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales, 2001.

WINDAHL, E.; BEURS, K. De. An intercomparison of Landsat land surface temperature retrieval methods under variable atmospheric conditions using in situ skin temperature. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, set. 2016. v. 51, p. 11–27. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.003>>.

WU, X.; ZHANG, L.; ZANG, S. Examining seasonal effect of urban heat island in a coastal city. **PLOS ONE**, 14 jun. 2019. v. 14, n. 6, p. e0217850. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0217850>>.

YANG, C. *et al.* Characterizing the Hourly Variation of Urban Heat Islands in a Snowy Climate City during Summer. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 11 jul. 2019. v. 16, n. 14, p. 2467. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/16/14/2467>>.

YU, X.; GUO, X.; WU, Z. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. **Remote Sensing**, 15 out. 2014. v. 6, n. 10, p. 9829–9852. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/6/10/9829>>.

ZAKŠEK, K.; OŠTIR, K.; KOKALJ, Ž. Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. **Remote Sensing**, 23 fev. 2011. v. 3, n. 2, p. 398–415. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/3/2/398>>.

ZAMPARONI, CLEUSA APARECIDA GONÇALVES PEREIRA; MOREIRA, AYOBAMI BADIRU NOBREGA, RANYERE SILVA. SANTOS, Pedro Felipe Cavalcanti. Desastres naturais, chuvas e alagamentos em Recife/PE: diagnóstico preliminar. Juiz de Fora, MG: XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2018. p. 1528–1537. Disponível em: <[www.abclima.ggf.br/sbcg2018](http://www.abclima.ggf.br/sbcg2018) 1528>.

ZANELLA, M. E.; MOURA, M. De O. O clima das cidades do Nordeste Brasileiro: contribuições no planejamento e gestão urbana. **Revista da Anpege**, 2013. v. 9, n. 11, p. 75–89. Disponível em: <<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/6493>>.

ZHOU, B. **On the assessment of surface urban heat island: size, urban form, and seasonality**. [S.l.]: 2017. 136 p. Tese (Doutorado), Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Potsdam, 2017. Disponível em: <<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-404383>>.

ZHU, S. *et al.* Preliminary verification of instantaneous air temperature estimation for clear sky conditions based on SEBAL. **Meteorology and Atmospheric Physics**, fev. 2017. v. 129, n. 1, p. 71–81. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00703-016-0451-3>>.