



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21b/2020/04.20.15.02-TDI

ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL POR SATÉLITE E ANÁLISE CLIMÁTICA EM MUNICÍPIO DE GRANDE PORTE NO BRASIL

Fabiana Lourenço e Silva Ferreira

Tese de Doutorado do Curso
de Pós-Graduação em Ciência do
Sistema Terrestre, orientada pelo
Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada
em 5 de maio de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/42C27TE>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

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

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

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21b/2020/04.20.15.02-TDI

ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL POR SATÉLITE E ANÁLISE CLIMÁTICA EM MUNICÍPIO DE GRANDE PORTE NO BRASIL

Fabiana Lourenço e Silva Ferreira

Tese de Doutorado do Curso
de Pós-Graduação em Ciência do
Sistema Terrestre, orientada pelo
Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada
em 5 de maio de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/42C27TE>>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ferreira, Fabiana Lourenço e Silva.

F413e Estimativas de temperatura superficial por satélite e análise climática em município de grande porte no Brasil / Fabiana Lourenço e Silva Ferreira. – São José dos Campos : INPE, 2020. xxx + 149 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2020/04.20.15.02-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientador : Dr. Enio Bueno Pereira.

1. Temperatura das superfícies. 2. Áreas urbanas.
3. Características espectrais. 4. Zonas climáticas locais.
5. Diagnóstico. I.Título.

CDU 551.525(1-21)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Fabiana Lourenço e Silva Ferreira**

Título: "ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL POR SATÉLITE E ANÁLISE CLIMÁTICA EM MUNICÍPIO DE GRANDE PORTE NO BRASIL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre

Dra. Silvana Amaral Kampel

Silvana Amaral Kampel

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Enio Bueno Pereira

Silvana Amaral Kampel

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Francisco Gilney da Silva Bezerra

Silvana Amaral Kampel

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

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Lucila Chebel Labaki

Silvana Amaral Kampel

Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Wilson Cabral de Sousa Júnior

Silvana Amaral Kampel

Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

EPÍGRAFE

“Quem não sonha o azul do voo perde seu poder de pássaro”.

Thiago de Mello

•

DEDICATÓRIA

A meus pais Julia e Hygino pelo amor dedicado.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e oportunidade para realizar múltiplas tarefas e atividades.

Ao meu orientador Dr. Enio Bueno Pereira pelo apoio, ética e serenidade na condução deste projeto de pesquisa.

A minha família e amigos pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência, e a todos aqueles, que direta ou indiretamente contribuíram para tornar esta jornada mais leve e tranquila.

A equipe do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), em especial para André Gonçalves Rodrigues, Rodrigo dos Santos Costa, Marcelo Pizzutti Pez, Jefferson Gonçalves de Souza e Francisco José Lopes de Lima.

À professora Dr. Lucila Chebel Labaki por ser um exemplo de mulher na ciência, pelo auxílio e orientações.

Ao pesquisador Francisco Gilney Silva Bezerra pelo auxílio e orientações.

Aos professores Silvana Amaral Kampel e Wilson Cabral de Souza Jr. pelo tempo dedicado na avaliação desta pesquisa.

Aos recursos humanos do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST): corpo docente, administração, alunos, pesquisadores e colaboradores.

Ao Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET) da Universidade Paulista (UNIP), de São José dos Campos, em especial ao coordenador do curso de Engenharia Civil, Dr. Cristiano Martins Foli pela tranquilidade e gentileza na condução dos trabalhos.

Aos alunos do curso de Engenharia Civil da Universidade Paulista (UNIP) pela motivação indireta e exemplo no enfrentamento das dificuldades da vida, em prol de uma evolução intelectual.

À Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa de doutorado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) financiado pela FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, e CAPES/FAPS Nº 16/2014.

Aos técnicos do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF) da Universidade estadual de Campinas (UNICAMP) pelo empréstimo da câmara termográfica.

A equipe da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) do aeroporto Urbano Ernesto Stumpf em São José dos Campos-SP por garantir o acesso a estação

meteorológica do aeroporto, em especial para o gerente de operações e segurança Sr. Marcelo Rodolfo Silva.

Ao Comando da Aeronáutica (COMAER) pelo acesso aos dados meteorológicos da estação do aeroporto de São José dos Campos.

À Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (EMPLASA) pela licença de uso de arquivos digitais.

Ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) pelas imagens do satélite *Landsat* utilizadas nessa pesquisa.

À Prefeitura Municipal de São José dos Campos, SP, pela disponibilização dos acervos e arquivos georreferenciados.

RESUMO

O aquecimento global pode aumentar a vulnerabilidade das populações ao calor e alterar o padrão de consumo de energia nas cidades. Nesse sentido faz-se necessário o desenvolvimento de políticas urbanas, que enfoquem o uso de infraestrutura verde, azul e cinza para promover a retroalimentação negativa do sistema climático urbano naturalmente. O objetivo desta pesquisa é desenvolver metodologia para produzir diagnósticos em diferentes escalas urbanas, considerando a distribuição da temperatura das superfícies e os padrões da paisagem; e fornecer informações para o desenvolvimento de políticas urbanas de adaptação e resiliência ao calor. O método contempla o uso de imagens Landsat-8, para estimar e mapear a temperatura das superfícies e suas características espectrais (albedo, emissividade, fração de cobertura de vegetação e índice de umidade por diferença normalizada), a integração dos dados num espaço celular georreferenciado, análises exploratórias, agrupamento de *clusters* de temperatura de superfície e identificação de zonas climáticas locais. A área de estudos é São José dos Campos, SP, Brasil, onde a zona climática local 3, com construções compactas de pequeno porte é predominante. Na área de estudos, a diferença de temperatura de superfície chegou a 12°C e ocorreu entre áreas onde observam-se superfícies permeáveis e sombreadas, associadas à presença de árvores e edificações verticais, denominadas “sumidouros de calor”, e áreas compostas por extensas construções em superfícies plenamente impermeabilizadas com intensa produção de calor antropogênico, denominadas “pontos quentes”. As análises permitiram inferir a dependência espacial da temperatura da superfície, apesar da variabilidade sazonal podendo ser utilizada como indicador do desempenho térmico e energético de áreas urbanas. O mapeamento da temperatura das superfícies e do índice de umidade por diferença normalizada permitiram identificar os fatores que influenciam os processos de retroalimentação negativa e positiva do sistema climático urbano, zonas climáticas locais associadas, e avaliar o impacto de políticas voltadas para promover a adaptação e a resiliência urbana ao calor.

Palavras-chave: Temperatura das superfícies. Áreas urbanas. Características Espectrais. Zonas Climáticas Locais. Diagnóstico.

SURFACE TEMPERATURE ESTIMATES BY SATELLITE AND CLIMATE ANALYSIS IN A LARGE MUNICIPALITY IN BRAZIL

ABSTRACT

Global warming will increase peoples' vulnerability to heat and alter energy consumption standards in the cities. This way we must develop urban policies which will focus on the green, blue and grey infrastructure to promote the negative feedback of the urban climatic system naturally. This research is aimed at developing a methodology to produce diagnosis of different urban scales, considering the distribution of surfaces' temperature, landscape patterns, and provide development of urban policies with data in the light of adaptation as well as resilience to heat. The method contemplates the use of images Landsat-8, to estimate and to map the surfaces' temperature and its spectral features (albedo, emissivity, fraction vegetation cover and normalized difference moisture index), the data integration at the cellular georeferenced space, exploratory analyses, clusters gathering of the surface temperature and the identification of local climatic zones. The study area is São José dos Campos, SP, Brazil, where the local climatic zone 3, together with compact construction sites of minor standards are predominant. In the study area, the difference in the surface temperature reached 12°C and took place in areas with permeable and shaded surfaces, associated to the presence of trees and vertical edifications, called "heat sinks", and areas composed by extensive constructions on fully impermeable surfaces with intense anthropogenic heat production, called "hot points". The analyses infer a special dependence of the surface temperature, despite its seasonal variability. The results indicated that the surfaces' temperature and normalized difference moisture index can be used as indicators of the thermic and energetic performance of urban areas, as it is likely to identify factors which influence negative and positive feedback processes of the urban climatic system associated to local climatic zones and evaluate the impact on policies which promote adaptation as well as urban resilience to heat.

Palavras-chave: Surface Temperature. Urban Areas. Spectral characteristics. Local Climate Zones. Diagnosis.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pag.</u>
Figura 2.1 - Escalas do clima urbano: mesoescala (a), escala local (b) e microescala (c)	6
Figura 2.2 - Zonas climáticas locais (zcls)	8
Figura 2.3 - Fator de Forma ou Canyon Urbano	19
Figura 2.4 - Consumo de eletricidade por equipamentos em residências no Brasil.	23
Figura 2.5 - Tendência mundial para o uso de energia para climatização artificial.	23
Figura 2.6 - Mecanismos de retroalimentação do clima urbano.	26
Figura 2.7 - Mecanismos de resfriamento para mitigar os efeitos das ICU.	27
Figura 2.8 - Base fisiológica para o desenvolvimento de Índices de Vegetação.....	28
Figura 2.9 - Imagem visível (a) e termográfica (b): TS em muro parcialmente coberto por vegetação	29
Figura 2.10 - Imagem visível (a) e termográfica (b): TS em via urbana.....	30
Figura 2.11 - Imagem visível (a) e termográfica (b): TS de coberturas de edificações.	31
Figura 2.12 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro	34
Figura 2.13 - Estratégias construtivas.....	34
Figura 2.14 - Carta bioclimática adaptada para o Brasil	35
Figura 3.1 - Fluxograma: etapas para consolidação do método e objetivos.....	37
Figura 3.2 - Localização de São José dos Campos, SP. Brasil.....	39
Figura 3.3 - rmvle: Detalhamento da sub-região1	39
Figura 3.4 - Macrozonas de São José dos Campos.....	40
Figura 3.5 - Média anual de temperatura do ar (Tar em °C) em SJC.	43
Figura 3.6 - Média anual de umidade relativa do Ar (%) em SJC	43
Figura 3.7 - Total anual de precipitação de chuvas (mm) em SJC.....	43
Figura 3.8 - Gráfico de caixa ou boxplot.....	45
Figura 3.9 - Zona bioclimática 3 (ZB3) e carta bioclimática.	45
Figura 3.10 - Média de irradiação solar global (Wh/m ² .dia) para o estado de São Paulo....	46
Figura 3.11 - Irradiação global horizontal em SJC: média diária mensal (Wh/m ² .dia).....	47

Figura 3.12 - Imagem do satélite Landsat-8 para a área de estudos em 21/01/2019.....	47
Figura 3.13 - Percentual de NDVI em Macrozona Urbana de SJC em 21/01/2019.....	51
Figura 3.14 - Espaço celular (CS): macrozona urbana (MU) de SJC.....	56
Figura 3.15 - Exemplo de diagrama de espalhamento de Moran.	59
Figura 4.1 - Imagem Google Earth na macrozona urbana de SJC em jan./2019.....	61
Figura 4.2 - Imagem Google Earth na macrozona de consolidação de SJC em jan./2019...	62
Figura 4.3 - Fração de cobertura de vegetação para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.....	63
Figura 4.4 - Conjunto de dados de FCV para macrozona urbana (MU) de SJC.	63
Figura 4.5 - Fração de cobertura de vegetação para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.....	64
Figura 4.6 - Conjunto de dados de FCV para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.	64
Figura 4.7 - Emissividade para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.	65
Figura 4.8 - Conjunto de dados de emissividade para macrozona urbana (MU) de SJC.	65
Figura 4.9 - Emissividade para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.	66
Figura 4.10 - Conjunto de dados de emissividade para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.....	66
Figura 4.11 - Albedo (A) para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.	67
Figura 4.12 - Conjunto de dados de albedo para macrozona urbana (MU) de SJC.	67
Figura 4.13 - Albedo (A) para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.	68
Figura 4.14 - Conjunto de dados de albedo para a macrozona de consolidação (MC) de SJC	68
Figura 4.15 - Índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.....	69
Figura 4.16 - Conjunto de dados de NDMI para macrozona urbana (MU) de SJC	69
Figura 4.17 - NDMI para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.....	70

Figura 4.18 - Conjunto de dados de NDMI para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.	70
Figura 4.19 - Temperatura de superfície (TS) para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.....	71
Figura 4.20 - Conjunto de dados de TS para macrozona urbana (MU) de SJC.	71
Figura 4.21- Temperatura de superfície (TS) para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.....	72
Figura 4.22 - Conjunto de dados de TS para a macrozona de consolidação (MC) de SJC..	72
Figura 4.23 - Calor antropogênico na macrozona urbana do município de SJC.....	73
Figura 4.24 - TS mediana nas macrozonas urbanas de SJC.....	74
Figura 4.25 - FCV mediana nas macrozonas urbana de SJC.....	74
Figura 4.26 - Emissividade mediana nas macrozonas de SJC.....	74
Figura 4.27 - NDMI mediana nas macrozonas de SJC.....	75
Figura 4.28 - Albedo nas macrozonas de SJC.....	75
Figura 4.29 - Calor antropogênico nas macrozonas de SJC.....	75
Figura 4.30 - Amostras selecionadas.....	76
Figura 4.31 - Exemplos de FCV para áreas com água tratada artificialmente (a) e áreas naturalmente alagadas (b) em SJC.	77
Figura 4.32 - Exemplos de amostras de solo exposto em SJC.	78
Figura 4.33 - Diagrama de dispersão: temperatura da superfície (TS em °C) estimada no pixel da estação meteorológica e Tar (°C) medido.	78
Figura 4.34 - Gráficos de dispersão: TS x FVC (a), TS x emissividade (b), TS x albedo (c), TS x NDMI (d) e TS x calor antropogênico em 21 de janeiro de 2019.	79
Figura 4.35 - Dependência espacial de TS na macrozona de consolidação urbana (MC) entre inverno (02/07/2014) e verão (10/01/2015).....	83
Figura 4.36 - Dependência espacial de TS na macrozona de consolidação urbana (MC) entre verão (08/02/2014 e 10/01/2015).	83
Figura 4.37 - Dependência espacial de TS na macrozona de consolidação urbana (MC) em 10/01/2015.....	84

Figura 4.38 - Pontos quentes (CL1_TS) e sumidouros de calor (CL2_TS) em SJC.....	85
Figura 4.39 - Temperatura de superfície (TS) para o CL1_TS e CL2_TS.....	85
Figura 4.40 - FCV para o CL1_TS e CL2_TS.	86
Figura 4.41 - Emissividade (ϵ) para o CL1_TS e CL2_TS.....	86
Figura 4.42 - NDMI para o CL1_TS e CL2_TS.....	86
Figura 4.43 - Albedo para o CL1_TS e CL2_TS.	87
Figura 4.44 - Calor antropogênico para o CL1_TS e CL2_TS.	87
Figura 4.45 - CL1_TS e CL2_TS áreas e classificação ZCL.	88
Figura 4.46 - Resultados dos testes para definição do numero de clusters.	90
Figura 4.47 - Mapa de Clusters(a) de temperatura de superfícies (TS) na macrozona de consolidação urbana de SJC.	90
Figura 4.48 - TS (°C) para 9 clusters.....	91
Figura 4.49 - FCV (%) para 9 clusters.	91
Figura 4.50 - Albedo (%) para 9 clusters	92
Figura 4.51 - Emissividade (ϵ) para 9 clusters.....	92
Figura 4.52 - NDMI para 9 clusters de TS.	93
Figura 4.53 - Calor antropogênico para 9 clusters de TS.....	93
Figura 4.54 - Clusters, zcls, TS e características espectrais.	94
Figura 4.55 - Clusters, zcls, TS e calor antropogênico.....	94
Figura 4.56 - CL6: LCZ3 ₂ (A) e LZC8 _E (B)	95
Figura 4.57 - CL1: LCZ3 ₂	95
Figura 4.58 - CL9: LCZA(A) e LCZB(B).....	96
Figura 4.59 - CL8: ZCL4(A), ZCL6(B) e ZCL9(C).....	96
Figura 4.60 - CL2: ZCL3 ₁₋₂	96
Figura 4.61 - CL3: ZCL3 ₁₋₂ (B).....	96
Figura 4.62 - CL4: ZCL6 ₄	97
Figura 4.63 - CL5(A) e CL7(B): ZCL9 _D	97
Figura 4.64 - Temperatura de superfície (TS) por quartil	99
Figura 4.65 - Distribuição de TS por quartil em janeiro de 2019.....	100

Figura 4.66 - Albedo por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.	101
Figura 4.67 - FCV por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.	101
Figura 4.68 - Emissividade por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.....	102
Figura 4.69 - NDMI por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.	102
Figura 4.70 - Calor antropogênico (Q_f) por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 2/01/2019.....	103
Figura 4.71 - FCV por quartil de TS.	104
Figura 4.72 - Emissividade (ϵ) por quartil de TS.....	105
Figura 4.73 - Albedo (A) por quartil de temperatura de superfície (TS).....	106
Figura 4.74 - NDMI por quartil de temperatura de superfície (TS).	107
Figura 5.1 - Percentual de pontos quentes e sumidouros de calor por setor sócio econômico em SJC.....	110
Figura 5.2 - Zonas climáticas locais em MC de SJC.....	111
Figura 5.3 - Variação da TS associada à verticalização, presença de umidade e FCV	112
Figura 5.4 - Efeito de retroalimentação negativa e positiva do sistema climático urbano. Dado pela utilização de vegetação.	114
Figura 5.5 - Exemplo de área alvo de política urbana de arborização.....	116
Figura A.1 - Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.....	132
Figura A.2 - Espectro da radiação solar e atenuação da atmosfera	133
Figura A.3 - Bandas de Absorção e Janelas Atmosféricas	134
Figura A.4 - Fluxo de Energia Incidente ou Irradiância (E_λ)	135
Figura A.5 - Densidade do fluxo de energia radiante, exitância ou emitância espectral (M_λ)	135

Figura A.6 - Refletância Solar difusa (a) e especular (b)	138
Figura A.7 - Curva de refletância da água.....	141
Figura B.1 – Cluster 1: ZCL3 e ZCL2	146
Figura B.2 – Cluster 2: ZCL3 e ZCL2	146
Figura B.3: Cluster 3: ZCL3 e ZCL2	147
Figura B.4: Cluster 4: ZCL3 e ZCL2	147
Figura B.5: Cluster 5: ZCL9 _D	147
Figura B.6: Cluster 6 (tipo 1): ZCL8 e ZCLE	148
Figura B.7: Cluster 6 (tipo 2): ZCL3.....	148
Figura B.8 - Cluster 7: ZCL9 _D	148
Figura B.9 – Tipo 1: ZCL4.....	149
Figura B.10 – Tipo 2: ZCL6 e ZCLB.....	149
Figura B.11 - ZCLA e B.....	149

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Radiação solar global em diferentes países (Watts.dia/m ²).....	12
Tabela 2.2 - Consumo de energia por habitante (Watts/hab.ano)	24
Tabela 2.3 - Variáveis, critérios e técnicas utilizadas para zoneamento climático	33
Tabela 3.1 - Densidade demográfica e densidade domiciliar na macrozona urbana do município de São José dos Campos, SP, Brasil.....	41
Tabela 3.2 - Lista de imagens do satélite Landsat8 e dados climáticos na hora de sua aquisição (13:00hs UTC ou 10:00hs Local)	48
Tabela 3.3 - Bandas e resoluções dos sensores do satélite Landsat 8	49
Tabela 3.4 - Fatores de Escala para Produtos da série Landsat Level-2.	50
Tabela 3.5 - Limites de NDVI utilizados para calcular a FCV	51
Tabela 3.6 - Limites de NDVI para a estimativa da emissividade (ϵ).....	52
Tabela 3.7 - Coeficientes de ponderação (W_b) utilizados para estimar A_{TOA}	54
Tabela 4.1 - Valores medianos de características espectrais estimados nesta pesquisa e valores obtidos na literatura.....	77
Tabela 4.2 - Coeficientes de correlação de <i>Spearman</i> (ρ_s) entre TS, características espectrais e calor antropogênico.....	79
Tabela 4.3 - Coeficientes de correlação de <i>Spearman</i> entre as variáveis espectrais na macrozona de consolidação urbana (MC).	81
Tabela 4.4 - Coeficientes de correlação de <i>Spearman</i> entre calor antropogênico (Q_f) e variáveis espectrais na macrozona de consolidação (MC) se São José dos Campos	81
Tabela 4.5 - Índice global de <i>Moran</i> (I) entre TS em diferentes datas.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de proteção ambiental
CCST	Centro de Ciência em Sistemas Terrestres
CI	Camada inercial
CLA	Camada limite atmosférica
COP 21	Conferência das Partes
CS	Espaço celular
Cs	Efeito de cavidade
DN	Numero digital registrado pelo sensor dos satélites para cada pixel
EC	Comissão européia (european comission)
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano
FCV	Fração de cobertura de Vegetação
GEA	Global energy assessment
GWP	Potencial de Aquecimento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilha de Calor Urbano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Municipal.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPPLAN	Instituto de Pesquisa Administração e Planejamento
IQR	Intervalo interquartil
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de
LACAF	Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada
Linf	Limite inferior do conjunto de dados
LSE	Emissividade da superfície terrestre
Lsup	Limite superior do conjunto de dados
MC	Macrozona urbana de consolidação
ME	Macrozona urbana de estruturação
MOC	Macrozona urbana de ocupação controlada
MR	Macrozona rural
MU	Macrozona urbana
NASA	Agência espacial americana
NBEN	NDVI based emissivity method

NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
ODS	Objetivo de desenvolvimento sustentável
OLI	Operational land imager
ONU	Organização das Nações Unidas
PCM	Materiais que mudam de fase
PMSJC	Prefeitura Municipal de São José dos Campos
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
Q1	Quartil 1 ou mediana inferior
Q3	Quartil 3 ou mediana superior
RCP	Representação de concentração de gases de efeito estufa
REM	Radiação eletromagnética
RMVale	Região metropolitana do Vale do Paraíba
RMSP	Região metropolitana de São Paulo
RMRJ	Região metropolitana do Rio de Janeiro
SAVI	Índice de Vegetação ajustado ao solo
SFX	São Francisco Xavier
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SONDA	Sistema de Organização de Dados Ambientais
SPC	Plugin de classificação semi automática
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SR	Subcamada de rugosidade
TIRS	Sensor infravermelho thermal
TM	Landsat thematic mapper
TS	Temperatura da superfície
UIT	Unidades de Informação Territorializada
UN	Nações Unidas
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USGS	Serviço geológico americano
WGS	Sistema geodésico mundial
ZBB	Zoneamento Bioclimático Brasileiro
ZCL	Zona climática local
PROCEL	Programa nacional de conservação de energia elétrica
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem

WRF	<i>Whether Research Forecast</i>
BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modelling System</i>
TEB	<i>Town Energy Budget</i>
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
REDEMET	Rede meteorológica do comando da aeronáutica

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Absortividade
A	Albedo ou reflectância hemisférica
ρ_λ	Albedo ou reflectância hemisférica
φ	Atraso térmico
c	Calor específico
C	Capacidade Térmica
ρ	Coefficiente de correlação
ρ_s	Coefficiente de correlação de Spearman
λ	Comprimento de onda
λ_{\max}	Comprimento de onda dominante
k	Condutividade térmica
σ	Constante de Stefan Boltzman
k	Constante de Wien (2.898 $\mu\text{m K}$)
ρ	Densidade
ΔT	Diferença de temperatura
Cs	Efeito de cavidade
ε	Emissividade
ε	Erro aleatório
CS	Espaço Celular
F	Fator de forma
Fso	Fator Solar
Q_r	Fluxo de calor antropogênico
λE	Fluxo de calor latente (evaporação e transpiração)
G	Fluxo de calor provenientes da superfície
H	Fluxo de Calor sensível
E_λ	Fluxo de energia incidente, irradiante ou irradiância
M_λ	Fluxo de energia irradiante, exitância ou emitância
Mr	Fluxo de energia irradiante, exitância ou emitância de um corpo cinza
Mb	Fluxo de energia irradiante, exitância ou emitância de um corpo negro
Φ	Fluxo radiante
ν	Frequência
GDA	Graus dia de aquecimento
GDR	Graus dia de resfriamento
I	Índice Global de <i>Moran</i>
P	Inércia termal
E	Irradiância

m	massa
W	Matriz de vizinhança
μm	Micrometro
nm	Nanômetro
DN	Números digitais
β	Parâmetros ou coeficiente de regressão
W	Peso espacial da matriz
WY	Produto que expressa dependência espacial em Y
Q	Quantidade de calor
$\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$	Quilowatt hora por metro quadrado por dia
$L \uparrow$	radiação de onda longa emitida ($L \uparrow$) pela superfície terrestre
$L \downarrow$	radiação de onda longa emitida pela atmosfera
I	Radiação solar incidente (direta e difusa)
L	Radiância
L_λ	Radiância espectral infravermelha recebida pelo sensor a bordo do satélite
L_s	Radiância observada no intervalo de comprimento de onda i na superfície terrestre
L^*	Saldo de radiação na superfície
T	Temperatura absoluta
T_{kim}	Temperatura cinética verdadeira
TS	Temperatura da superfície
T_b	Temperatura de base para conforto
TB	Temperatura de brilho
T_{rad}	Temperatura radiante
U	Transmitância térmica
c	Velocidade da luz (aproximadamente 300.000 Km/seg)
$\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$	Watt-hora por metro quadrado por dia
W / m^2	Watts por metro quadrado
$W / \text{m}^2\text{sr}$	Watts por metro quadrado por esferoradiano

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo.....	3
1.1.1Objetivos específicos:.....	3
1.2 Estrutura da Tese.....	3
2 Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Clima urbano.....	5
2.1.1Zonas climáticas locais (ZCL).....	7
2.1.2Balanço de energia em áreas urbanas.....	11
2.2 Métodos para análises do clima urbano.....	14
2.3 Fatores associados ao desempenho térmico e energético de superfícies urbanas ...	22
2.3.1Calor antropogênico nas zonas climáticas locais.....	22
2.3.2Tecnologias passivas.....	26
2.3.3 Zoneamento climático e eficiência energética em edificações.....	32
2.3.4 Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBB).....	34
3 Materiais e métodos.....	36
3.1 Área de estudos.....	38
3.1.1 Classificação climática da área de estudos.....	42
3.2 Definição do período de análise e seleção das imagens.....	47
3.3 Estimativa e mapeamento das características espectrais e temperatura superfícies..	50
3.3.1 Fração de cobertura de vegetação (FCV).....	50
3.3.2 Emissividade da superfície (E).....	52
3.3.3 Albedo ou refletância das superfícies (A).....	53
3.3.4 Índice de umidade por diferença normalizada (NDMI).....	55
3.3.5 Temperatura da superfície terrestre (TS).....	55
3.3.6 Calor Antropogênico (Q _f).....	55
3.4 Integração e verificação dos dados no espaço celular.....	56

3.5 Análises Exploratórias.....	57
4 Resultados	61
4.1 Verificação dos resultados	76
4.2 ANÁLISEs de correlação.....	79
4.3 ANÁLISES de autocorrelação espacial	82
4.4 ANÁLISE de <i>clusters</i>	89
4.5 Análise de Outliers ou resultados extremos	98
5 Discussão.....	108
6 Conclusão.....	117
6.1 Sugestão para trabalhos futuros.....	118
Referencias Bibliográficas.....	119
Apêndice A - Princípios básicos para interpretações de imagens DE satélites	131
A.1 Interações Atmosfera e fluxos de energia radiante.....	133
A.2 Interações Matéria e fluxos de energia radiante	134
A-3 ESTIMATIVA DA VEGETAÇÃO E ÁGUA POR SATÉLITE.....	139
A.4 Temperatura das superfícies	142
Apêndice B – Amostras para classificação das Zonas Climáticas Locais.....	146
B.1 Amostras do Cluster 1 (CL1).....	146
B.2 Amostras do Cluster 2 (CL2).....	146
B.3 Amostras do Cluster 3 (CL3).....	147
B.4 Amostras do Cluster 4 (CL4).....	147
B.5 Amostras do Cluster 5 (CL5).....	147
B.6 Amostras do Cluster 6 (CL6).....	148
B. 7 Amostras do Cluster 7 (CL7).....	148
B. 8 Amostras do Cluster 8 (CL8).....	149
B.9 Amostras do Cluster 9 (CL9).....	149

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais tornam de extrema importância o desenvolvimento de tecnologias para mitigação das emissões de gases de efeito estufa e principalmente de adaptação das cidades, frente às alterações nos padrões climáticos, dadas às previsões do aumento das temperaturas no planeta e maior ocorrência de eventos extremos como as ondas de calor.

A despeito das incertezas inerentes nos modelos climáticos, que apresentam resultados bastante coerentes com os dados observacionais, e devido ao fato de que o sistema climático é regido por mecanismos altamente não-lineares, não se pode desprezar a real possibilidade de que uma postura mundial com base no “business as usual” pode levar a uma rota de aquecimento global entre 4 a 6°C na virada do século. Assim, ações de adaptação a esses possíveis cenários devem acompanhar todo e qualquer esforço de mitigação das emissões. Entre essas ações, destacamos a questão do ambiente urbano que, como veremos, é onde se concentra a maior parte da população e tem a maior demanda por recursos de energia (KIRTMAN et al., 2013).

As cidades são consideradas pontos chaves ou “hot spots” para minimizar o impacto antrópico no clima planetário. Embora representem somente 2% da superfície do planeta, são responsáveis pelo consumo de 75% de toda energia produzida e geram aproximadamente 55% dos gases de efeito estufa devido à demanda de energia produzida por combustíveis fósseis (UN-HABITAT, 2016).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (UNDESA, 2014), até 2030 mais de 60% da população mundial estará vivendo nos centros urbanos e regiões metropolitanas, as projeções estimam que quase sete bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas urbanas no ano de 2050. No Brasil, o censo de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), aponta que mais de 80% dos 190 milhões de habitantes já vivem em cidades (IBGE, [s.d.]). A migração da população para as cidades e o estilo de vida urbano contribuem para um significativo aumento do consumo de energia no mundo.

O desafio para as cidades é implementar políticas para incentivar a redução do consumo de energia e emissões relacionadas. O objetivo é reduzir a vulnerabilidade das populações urbanas às mudanças climáticas globais e minimizar os efeitos do aumento das temperaturas na saúde humana (UN-HABITAT, 2016).

A Agenda 2030, criada com o objetivo de promover benefícios para humanidade e para o planeta, contém 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com 169 metas associadas. Os ODSs foram elaborados para equilibrar as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. O ODS11 sobre cidades e comunidades sustentáveis é o eixo central do processo, onde os outros 16 ODS devem estar associados para transformar a Agenda 2030 em ações concretas. Cada cidade e região deve adaptar os objetivos e metas a seus contextos e locais específicos, definindo meios de implementação dos ODSs, bem como indicadores para medir e acompanhar o progresso (ONU, 2015, 2016).

No Brasil, as políticas voltadas para promover o equilíbrio ambiental e a sustentabilidade, em paralelo à equidade social em áreas urbanas, são prescritas na Lei 10257/2001, também conhecida como “Estatuto das Cidades”. O Estatuto das Cidades prevê uma série de instrumentos legais voltados para regular o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem estar dos cidadãos. O estatuto estabelece que o plano diretor é a principal ferramenta para o desenvolvimento da política urbana, onde devem ser estabelecidas as metas e os objetivos para o desenvolvimento das cidades, bem como normas de ordem pública e interesse social. O plano diretor é o instrumento da política urbana que dá origem a diversas leis, que delimitam o uso e ocupação do solo urbano nos municípios, como por exemplo as leis de zoneamento urbano, planos de mobilidade entre outro (BRASIL, 2001).

O planeta já aqueceu mais de 1°C em relação ao período pré-industrial. O desafio atual é limitar o aquecimento global em 1,5°C até 2050, e para isso as emissões relativas ao estoque de edifícios no mundo precisam ser reduzidas entre 80-90% em relação ao ano de 2010. A redução das emissões referentes aos edifícios estão relacionadas às mudanças de hábitos e de consumo e estilo de vida da população urbana. A implementação de tecnologias construtivas mais eficientes, que incorporem a utilização de métodos baseados na natureza, podem e devem ser incorporadas nas leis urbanísticas que ordenam o crescimento das cidades. A política urbana pode servir como um acelerador no processo de transição dos sistemas que integram o meio ambiente urbano, visto que as cidades são polo de desenvolvimento tecnológico e disseminação de novas ideias e tecnologias (BAZAZ et al., 2018).

As emissões de gases de efeito estufa, atribuídas aos edifícios, estão atreladas ao uso da eletricidade e como ela é produzida (GEA, 2012). No mundo, o setor da economia que mais consumiu energia elétrica em 2017 foi o setor industrial, que consumiu aproximadamente 87,80%, seguido pelo setor de edificações, que consumiu aproximadamente 10,20%, e pelos setores agricultura, pesca e transportes, dentre outros usos não especificados que consumiram cerca de 2%. No Brasil, em 2017 o setor de edificações consumiu 53,65% de toda energia elétrica produzida, seguido pelo setor industrial, que consumiu 40,05%; agricultura, 5,75% e transportes 0,05 % (EPE, 2020; IEA, 2020). As emissões dos edifícios mais que dobraram desde 1970, atingindo a marca de 9,18GtCO₂ equivalente em 2010, isto corresponde a 19% de todas as emissões de gases de efeito estufa (LUCON et al., 2014).

Os edifícios necessitam de grande quantidade de energia ao longo de sua existência, seja no processo construtivo, seja na manutenção ou operação de suas instalações. A maior parte do consumo é resultante da demanda por manutenção de uma temperatura confortável, sendo atribuída a sistemas de climatização artificial para aquecimento ou arrefecimento das temperaturas (UN-HABITAT, 2016). Dos 34% da energia elétrica utilizada nos edifícios aproximadamente 25% são utilizados para a climatização artificial. A média de consumo varia de região para região e do uso que se faz da edificação. Na maioria das cidades a demanda de energia para resfriamento de ar no verão irá exceder a demanda para aquecimento no inverno (LUCON et al., 2014).

O momento exige dos governantes ao redor do mundo ações de ordem prática, que possam ser incorporadas às políticas urbanas, no sentido de promover o melhor desempenho térmico e energético das cidades, através da construção de uma infraestrutura urbana resiliente e adaptada para promover a sustentabilidade frente ao aquecimento global.

Neste sentido, e considerando que o tecido urbano é resultado das características sociais e econômicas da população que o habita, faz-se necessário a avaliação das melhores práticas de ocupação urbana, que resultam no tecido urbano consolidado. A análise do desempenho térmico e energético de diferentes tipologias e arranjos urbanos, a partir da distribuição da temperatura das superfícies em cidades, pode auxiliar na identificação de padrões da paisagem e tipologias construtivas, com melhor desempenho térmico e energético, para que possam ser utilizados como referência no desenvolvimento de políticas urbanas e indicadores, que incorporem a agenda ambiental para as cidades.

A área de estudos, definida nesta pesquisa, foi o município de São José dos Campos, SP, Brasil, um município de grande porte, localizado na região Sudeste brasileira, que se destaca no cenário brasileiro, como polo de desenvolvimento industrial e tecnológico.

1.1 Objetivo

O objetivo principal desta pesquisa foi identificar indicadores do desempenho térmico e energético de áreas urbanas que podem fornecer informações para o desenvolvimento de políticas urbanas voltadas para adaptação e resiliência ao calor.

1.1.1 Objetivos específicos:

1. Desenvolver metodologia para produzir diagnósticos do clima urbano, em diferentes escalas, considerando a distribuição da temperatura das superfícies, características do tecido urbano e padrões da paisagem;
2. Fornecer informações para o desenvolvimento de políticas urbanas de adaptação e resiliência ao calor nas cidades.

1.2 Estrutura da tese

O capítulo 1, denominado “Introdução” apresenta um breve relato sobre as questões que se relacionam ao tema em estudo, bem como a motivação que desencadeou sua escolha.

O capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta uma revisão sobre o estado da arte do clima urbano e fatores associados. No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos sobre clima urbano: zonas climáticas locais e balanço de energia em áreas urbanas; métodos para análise do clima urbano e fatores associados ao desempenho térmico e energético de áreas urbanas:

calor antropogênico, tecnologias passiva, zoneamento climático e eficiência energética e zoneamento bioclimático brasileiro.

O capítulo 3, Materiais e Métodos, apresenta a descrição do método utilizado para realizar esta pesquisa, a descrição da área de estudos e bases de dados e softwares utilizados.

O capítulo 4, Resultados, apresenta os resultados das estimativas e mapeamentos, realizados por satélites, o processo de verificação dos dados e os resultados das análises exploratórias realizadas.

No capítulo 5, Discussão, foi realizada uma discussão com base nos resultados obtidos, apresentados no capítulo anterior.

No capítulo 6, o último, denominado Conclusão, é apresentada a conclusão global, bem como sugestões para a realização de trabalhos futuros.

O apêndice A faz uma revisão sobre os métodos de aquisição de informações da superfície terrestre por satélites e princípios básicos do sensoriamento remoto.

O apêndice B apresenta as amostras utilizadas para a identificação das Zonas Climáticas Locais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Clima urbano

Conforme as cidades se expandem elas criam seus climas próprios e distintos. As áreas urbanas apresentam temperaturas superiores às das áreas rurais, fenômeno denominado ilha de calor urbana (ICU). Tradicionalmente a intensidade das ICUs é dada pela diferença de temperatura entre áreas urbanas e rurais. Estudos realizados em várias cidades concluem que as áreas urbanas, podem estar entre 2 e 12° C mais altas que o entorno rural, e que esse fenômeno se intensifica durante a noite. A intensidade das ICU está relacionada às variações de energia e água no ambiente urbano, são também influenciadas pelas características termo físicas e morfológicas dos constituintes urbanos, das condições sinóticas, do clima local e da atividade antropogênica, que remete a processos relacionados ao uso de transporte, atividades industriais, e uso de energia para condicionamento de ar e iluminação artificial (OSMOND et al., 2017).

As ICUs interferem na qualidade de vida nas cidades, pois degradam o ambiente térmico urbano, induzindo ao aumento dos riscos à saúde relacionados ao calor e ao aumento da poluição atmosférica, são também responsáveis pelo aumento da demanda energia para ar condicionado no verão (AKBARI et al., 2015).

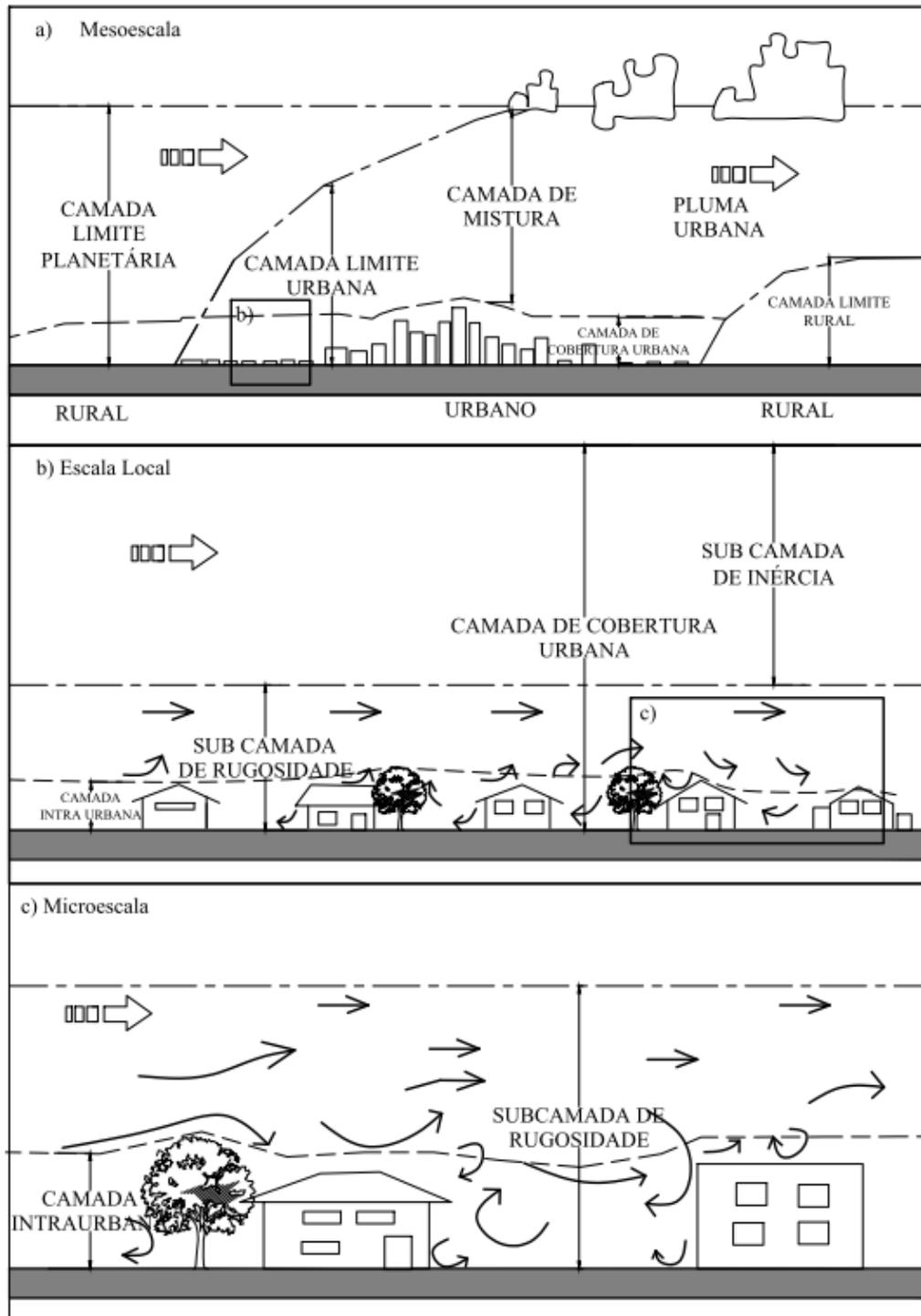
Segundo Oke (1982) as ICUs são consequência do aprisionamento da radiação solar e da radiação de onda longa entre as edificações, diminuição do resfriamento radiativo, excesso de calor armazenado nos materiais de construção, calor antropogênico, redução do potencial de evapotranspiração das áreas urbanas e redução das perdas de calor por convecção dada à redução na velocidade dos ventos.

A variabilidade do sistema climático urbano e seus mecanismos de retroalimentação exigem uma abordagem multidisciplinar em diferentes escalas de tempo e espaço, onde o conceito de escala deve ser aplicado no processo de avaliação do clima urbano, no plano horizontal e vertical.

As áreas de influência das ICUs são analisadas em diferentes escalas e dimensões: horizontal, vertical e temporal. Podem ser observadas em assentamentos urbanos de grande e pequena dimensão, o que pode ser amplificado em função da densidade da população (OKE, 1982). No plano horizontal Oke (2006) convencionou três escalas de análise: meso escala, escala local e microescala.

Na meso-escala (Figura 2.1a) considera-se a cidade como um todo, o clima é representado por várias estações meteorológicas e tem a extensão de dezenas de quilômetros. Na escala local (Figura 2.1b) o clima é consequência das características da paisagem (topografia) e do entorno próximo, tipologias e padrões construtivos dos bairros. As distâncias utilizadas na escala local variam de uma centena de metros a quilômetros. Na microescala (Figura 2.1c), o microclima é definido a partir da influência de edificações, áreas verdes e características dos pavimentos, em distâncias que variam de alguns milímetros a uma centena de metros.

Figura 2.1 - Escalas do clima urbano: mesoescala (a), escala local (b) e microescala (c)



Fonte: Adaptado de: Oke (2006), traduzido.

No plano vertical, pode-se de maneira simplificada considerar somente duas camadas atmosféricas: a camada limite urbana e a camada intraurbana ou camada de cobertura urbana (LOMBARDO, 1985). A camada limite urbana sofre influência da morfologia urbana, situa-se diretamente acima da escala intraurbana ou de cobertura urbana e atua na escala meso-climática, sob a influência dos ventos regionais. Já a camada intraurbana ou de cobertura urbana aborda o problema na microescala, onde as pessoas vivem, vai do nível do solo até o nível das coberturas das edificações e engloba setores entre os edifícios da cidade que interferem diretamente nos microclimas (OKE, 1976). As camadas limite urbana e intraurbana têm extensões variadas no tempo e no espaço e aumentam e diminuem em estilo rítmico, de acordo com o ciclo solar diário (BARBIRATO; TORRES; SOUZA, 2011).

2.1.1 Zonas climáticas locais (ZCL)

A complexidade do ambiente urbano e os diferentes padrões de uso e ocupação do solo nas cidades exigem que se utilizem sistemas de classificação do território urbano, que possam representar as características microclimáticas das diversas tipologias urbanas e suas particularidades. Os primeiros avanços nos estudos sobre climatologia urbana, que extrapolaram a classificação urbano-rural ocorreram na década de 60, quando foram realizados estudos baseados na classificação das cidades por zonas climáticas, que são caracterizadas a partir de padrões da paisagem urbana (STEWART; OKE, 2012).

Tradicionalmente a intensidade das ilhas de calor urbanas é obtida a partir da diferença de temperatura entre áreas “urbanas” e “rurais”, essa abordagem tem limitações e é incapaz de representar as diversas configurações da paisagem urbana. Neste sentido, o sistema de classificação das áreas urbanas em zonas climáticas locais (ZCLs), proposto por Stewart e Oke (2012), vem sendo cada vez mais utilizado para avaliar as diferenças no desempenho térmico e energético das superfícies urbanas, pela comparação das temperaturas nas diferentes ZCLs.

No sistema proposto por Stewart e Oke (2012), a classificação das ZCLs foi feita a partir caracterização lógica da estrutura do tecido urbano e características da paisagem, considerando a cobertura, uso da terra e metabolismo que ocorre em função das atividades antropogênicas. A classificação de áreas urbanas, em ZCLs, tem o objetivo padronizar diferentes tipologias construtivas urbanas ao redor do mundo, identificar áreas homogêneas ou áreas de transição, e caracterizar áreas urbanas e seu entorno, bem como avaliar diferenças de desempenho térmico sob condições meteorológicas diversas. As ZCLs definem-se como regiões homogêneas, na escala horizontal local, cuja estrutura da superfície é uniforme e tipologias construtivas e antropogênicas são similares (STEWART; OKE, 2012).

A classificação das ZCLs é feita a partir de dezessete classes, para as quais foram estabelecidos parâmetros genéricos das propriedades térmicas de cada classe de ZCLs, com base em experimentos realizados em diversas áreas urbanas ao redor do planeta. Em dez ZCLs, a classificação é feita a partir da estrutura do tecido urbano: tipologia construtiva, forma e distribuição das edificações e em sete ZCLs, a classificação é feita a partir das

características da cobertura do solo: água, árvores densas, árvores esparsas, solo exposto, tipos de pavimentos, entre outros. A Figura 2.2 apresenta as diferentes tipologias construtivas e alguns parâmetros utilizados caracterização de cada ZCL: fator de forma, altura dos elementos que compõe as ZCLs (edificações e árvores), percentual de área impermeável, admitância térmica, albedo da superfície, coeficiente de rugosidade e calor antropogênico. Os autores alertam que os parâmetros estabelecidos variam em função das características regionais e culturais dos diferentes agrupamentos urbanos e devem ser estimados para cada área em análise (STEWART; OKE, 2012).

Figura 2.2 - Zonas climáticas locais (ZCLs)

Zona Climática Local (ZCL)	Descrição	Fator de Forma	Altura dos elementos (metros)	Cobertura impermeável (%)	Calor antropogênico (W/m ²)
 ZCL1	Ocupações compactas com edificações verticais de grande porte	>2,00	>25	40-60	50-300
 ZCL2	Ocupações compactas com edificações de médio porte.	0,75-1,50	8-20	30-50	<75
 ZCL3	Ocupações compactas com edificações de pequeno porte.	0,75-1,50	3-8	20-40	<75
 ZCL4	Ocupações esparsas com edificações verticais intercaladas por vegetação	0,75-1,25	>25	30-40	<50
 ZCL5	Ocupações esparsas com edificações de médio porte (gabarito médio) intercaladas por	0,30-0,75	8-20	30-50	<25
 ZCL6	Ocupações esparsas com edificações de pequeno porte (gabarito baixo) intercaladas por	0,30-0,75	3-8	20-40	<25

Continua

Figura 2.2 - Continuação

<p>ZCL7</p> 	Ocupações compactas com edificações leves de pequeno porte	1,00-2,00	2-4	<10	<35
<p>ZCL8</p> 	Ocupações esparsas com edificações de extensas de médio porte em áreas	0,10-0,30	3-10	40-50	<50
<p>ZCL9</p> 	Ocupações esparsas em áreas predominantemente permeáveis	0,1-0,25	3-8	<20	<10
<p>ZCL10</p> 	Ocupações com edificações industriais	0,2-0,5	5-15	20-40	>300
<p>ZCLA</p> 	Cobertura: árvores densas	>1	3-30	<10	0
<p>ZCLB</p> 	Cobertura: árvores esparsas	0,25-0,75	3-15	<10	0
<p>ZCLC</p> 	Cobertura: mato ou arbusto	0,25-1,0	<2	<10	0
<p>ZCLD</p> 	Cobertura: pasto ou vegetação de pequeno porte	<0,10	<1	<10	0
<p>ZCLE</p> 	Cobertura: pavimento ou pedra	<0,10	<0,25	<10	0

Continuação

Figura 2.2 - Conclusão

 <p>ZCLF</p>	<p>Cobertura: solo exposto ou areia</p>	<p><0,10</p>	<p><0,25</p>	<p><10</p>	<p>0</p>
 <p>ZCLG</p>	<p>Cobertura: Água</p>	<p><0,10</p>	<p>0</p>	<p><10</p>	<p>0</p>

Fonte: Adaptado de Stewart, Oke e Krayenhoff (2014).

O mapeamento das Zonas climáticas locais (ZCLs) pode ser feito através da abordagem de cima para baixo (*top-down*), quando se utilizam dados de satélites, ou pela abordagem de baixo para cima (*botton-up*), quando se utilizam base de dados locais ou observacionais.

O projeto que visa a construção do Banco Mundial de Dados Urbanos (*WUDAPT - World Urban Database*), prevê a construção de uma mapa global para a classificação das áreas urbanas em ZCLs, de acordo com a classificação proposta por Stewart e Oke (2012), de modo a auxiliar no desenvolvimento de estudos do clima urbano (WUDAPT, 2015). Nesse sistema, o mapeamento das ZCLs é feito de cima para baixo (*top-down*) e imagens do satélite *Landsat*, com resolução espacial de quinze a 100 metros, são utilizadas. Nessa abordagem o mapeamento das ZCLs é feito pelo método de classificação supervisionada, onde amostras de treinamento são selecionadas por um conhecedor do meio ambiente urbano, para que o mapeamento da área em análise, seja executado automaticamente, e incorporado ao mapa global (BECHTEL; DANEKE, 2012).

Hidalgo et al. (2019) compararam os resultados de mapas de Zonas Climáticas Locais (ZCLs), gerados por observações de satélites, numa abordagem de cima para baixo (*top-down*), conforme os procedimentos estabelecidos pelo projeto WUDAPT, e mapas gerados a partir de banco de dados administrativos das cidades de Nantes, Toulouse e Paris na França, aplicando uma abordagem de baixo para cima (*botton-up*).

No método proposto, utilizando a abordagem de baixo para cima, o mapeamento das ZCLs foi feito com base em indicadores morfológicos e tipologias construtivas, extraídos do banco do banco de dados admirativos de cada cidade analisada. Neste processo as ZCLs foram classificadas a partir de um método semiautomático de *clusters*, baseado nos valores medianos de alguns atributos (ex. altura das edificações) e na distância euclidiana. Os resultados permitiram concluir que o uso de banco de dados administrativos, com alta resolução espacial, onde uma classificação de baixo para cima (*bottom-up*) é realizada, permite identificar com mais precisão as ZCLs. Os autores sugerem que caso não existam banco de dados com alta resolução espacial, outras formas de classificação de ZCLs, como por exemplo: amostragens manuais, levantamentos em campo, ou imagens de satélite com

alta resolução espacial, devem ser aplicadas para garantir maior precisão. Ressaltam que os dados obtidos de cima para baixo (top-down), aplicados na metodologia indicada pelo projeto WUDAPT, fornecem parâmetros adequados para modelagens numéricas, com resolução espacial de 1 a 4 quilômetros (km), porém nas análises microclimáticas, as informações sobre o tecido urbano devem ser produzidas com maior precisão e resolução espacial. As abordagens de baixo para cima (*botton-up*), provenientes de banco de dados de cidades, obtidas através da integração de dados multidisciplinares em Sistemas de Informação Geográficas (SIGs), podem ser utilizadas neste processo, onde as informações são obtidas em células e regras e algoritmos são utilizados para classificar a superfície urbana e ZCLs (HIDALGO et al., 2019).

2.1.2 Balanço de energia em áreas urbanas

A energia ou radiação eletromagnética emitida pelo Sol é a força motriz do sistema climático terrestre sendo responsável pelo ganho de calor nas superfícies e na atmosfera (PITMAN, 2003). O sistema climático terrestre é entendido como um sistema termodinâmico, tal como uma máquina térmica movida pelo balanço entre a radiação solar incidente e a emitida. O balanço energético que determina o equilíbrio do Sistema Climático Terrestre é uma consequência da interação do Sistema Terra-Sol resultante da quantidade de radiação solar ou de onda curta absorvida e refletida pela superfície e atmosfera da Terra e da quantidade de radiação de onda longa emitida pelas superfícies e pela atmosfera da Terra (LIEPERT, 2010).

Nas cidades, o clima urbano, pode ser estudado a partir da distribuição da temperatura das superfícies, que é resultado do saldo da radiação solar absorvida pelas superfícies que é transformada em calor. O balanço de energia nas superfícies urbanas, que determina o clima urbano, pode ser analisado a partir da Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece o princípio da conservação da energia (SHAHMOHAMADI et al., 2011).

Os fatores determinantes do aquecimento das superfícies urbanas podem ser descritos pela Equação 2.1, que define o balanço de energia em superfícies terrestres, adaptada para as áreas urbanas, considerando o calor gerado pelas atividades humanas. A Equação 2.1 permite avaliar as condições climáticas em uma unidade de área, próximas de uma superfície plana, horizontal e homogênea (TAHA, 1997).

$$(1-A) E_{\lambda} + L^* + Q_f = H + \lambda E + G \quad (2.1)$$

A _ albedo (refletância a radiação solar direta e difusa) _ adimensional

E_{λ} _ Irradiância (W/m^2)

L^* _ saldo de radiação de onda longa na superfície _ W /m^2

Q_f _ calor antropogênico ou fluxo de calor gerado por atividade humana _ W /m^2

H _ fluxo de calor sensível _ W /m^2

λE _ fluxo de calor latente (evaporação e transpiração) _ W /m^2

G _ fluxo de calor proveniente da superfície _ W /m^2

O lado esquerdo da Equação 2.1 representa o ganho de calor no sistema climático terrestre, que ocorre a partir da interação do sistema Terra-Atmosfera. A irradiância ($E\lambda$) que atinge a superfície terrestre varia continuamente no espaço e no tempo, depende da localização geográfica, orientação cardinal, dia do ano, horário e condições atmosféricas. Na escala local é afetada por três principais parâmetros: composição da atmosfera, comprimento da trajetória do Sol pela atmosfera e obstruções por sombreamento (BUTERA et al., 2014). A Tabela 2.1 apresenta os níveis de radiação solar global diários, em Watts por metro quadrado ($Watts/m^2$), em alguns países, onde pode-se observar a variabilidade nos níveis de radiação solar global ao redor do planeta (GSA, 2020). Neste contexto, e avaliando a variabilidade nos níveis de radiação solar ao longo do ano, o Brasil destaca-se pela baixa variabilidade e alto nível de irradiação solar quando comparado à países como Alemanha, Portugal, Inglaterra e Espanha (PEREIRA et al., 2017).

Tabela 2.1 - Radiação solar global em diferentes países ($Watts.dia/m^2$)

Local	Radiação Solar Global ($Watts.dia/m^2$)	
	Mínimo	Máximo
Inglaterra	87,5	127,9
Alemanha	114,6	139,2
Rússia	107,1	162,1
Portugal	142,1	211,7
Espanha	135,8	227,1
China	110,0	234,6
Índia	157,1	235,0
Estados Unidos	116,0	250,0
Brasil	172,9	255,0
Austrália	157,1	265,4
África do Sul	181,7	266,3

Fonte: Adaptado de GSA (2020).

O albedo (A) ou refletância hemisférica é a propriedade que determina a quantidade de radiação solar, em intervalos de comprimento de onda entre 280 e 2500nm aproximadamente, que é refletida por uma superfície (BRETZ, AKBARI, ROSENFELD, 1998). O conjunto de valores de refletância de um alvo remete a sua assinatura espectral, que está relacionada a irradiância sobre ele incidente numa determinada faixa espectral e da refletância do alvo naquela mesma faixa. A assinatura espectral dos alvos é dada por sua refletância em

determinados comprimentos de onda o que possibilita sua identificação por sistemas de sensores remotos (LORENZZETTI, 2015).

O saldo de radiação de onda longa na superfície (L^*) é dado pela soma da radiação de ondas longas emitidos pela atmosfera ($L \downarrow$), que tem sua origem nas nuvens e constituintes atmosféricos, e da radiação de onda longa emitida ($L \uparrow$) pela superfície terrestre. A quantidade de radiação emitida e os comprimentos de onda emitidos ocorrem em função da emissividade (ϵ) (Equação 2.2) (TAHA, 1997). A emissividade dos materiais é influenciada por diversos fatores: cor, composição química, rugosidade superficial, teor de umidade, compactação, campo de visada, comprimento de onda e ângulo de visada, sendo um dos elementos fundamentais para o cálculo da temperatura das superfícies obtidas por informações dos sensores remotos (JENSEN, 2009).

$$\epsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad (2.2)$$

ϵ _ emissividade

M_r _ exitância ou emitância espectral de um corpo real ou corpo cinza

M_b _ exitância ou emitância de um corpo negro

O calor antropogênico (Q_f) ou calor antrópico, corresponde ao calor gerado por atividades humanas nos processos de produção industrial, nos sistemas para climatização e iluminação artificial em edificações e sistemas de transporte, onde os processos metabólicos que envolvem humanos e animais são considerados fontes de calor (SHAHMOHAMADI et al., 2011).

O lado direito da Equação 3.1 representa os processos de conversão de energia na superfície Terrestre, e define as condições climáticas, visto que aproximadamente 30% da radiação solar incidente no topo da atmosfera é refletida, enquanto que os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do ar em função das características de suas superfícies.

Os fluxos de calor sensível (H) representam as variações de temperatura dos corpos, sem que ocorram alterações na estrutura física dos corpos. Neste processo os ganhos ou perdas térmicas, ocorrem pelo movimento aleatório das moléculas em fluídos ou sólidos a partir das interações com o meio em que se encontram. O sentido do fluxo de calor dar-se-á sempre da maior temperatura para a menor temperatura (SCHMIDT; HENDERSON; WOLGEMUTH, 1993). Nas cidades os fluxos de calor sensível (H), são afetados pela forma, disposição das edificações e características naturais como relevo, corpos de água e áreas verdes. Os mesmos são muitas vezes reduzidos pela rugosidade das superfícies urbanas, que alteram os padrões de circulação de ar (SHAHMOHAMADI et al., 2011).

O atrito das massas de ar em movimento com construções rugosas urbanas geram fluxos de ar turbulentos, que favorecem as trocas de calor sensível por convexão. Os fluxos de calor sensível são influenciados pela distância entre os elementos que compõe a massa edificada. Quanto maior a proximidade entre os elementos construídos, mais comprometidas ficam as

trocas turbulentas de calor sensível, por outro lado, quanto maior o contraste de altura entre as edificações e o espaçamento ou porosidade entre os elementos construídos, maior o turbilhonamento dos ventos e as trocas térmicas com o ambiente atmosférico, o que induz a um menor ganho térmico pelas estruturas urbanas e menores temperaturas do ar (OLIVEIRA, 1988).

Os fluxos de calor latente (λE) representam as variações de temperatura dos corpos, que ocorrem a partir da alteração na estrutura física da matéria, é a grandeza física que informa a quantidade de energia térmica (calor) que uma unidade de massa deve perder ou receber para que mude de fase. Na equação do balanço de energia essa grandeza representa os fluxos de calor que contribuem para o resfriamento evaporativo nas áreas urbanas, resultado dos processos de evaporação da água que retiram o calor do ambiente através da evaporação, resfriando o ar durante este processo. A água retida no solo, vegetação e corpos de água nas cidades e a água produzida pela vegetação, através da secreção ou “transpiração” pelos estômatos das folhas, contribuem para minimizar as temperaturas urbanas (TAHA, 1997).

Os fluxos de calor do solo (G) representam a taxa de armazenamento de calor no solo e na vegetação. Estão relacionadas às propriedades térmicas dos materiais, que remetem a capacidade de um corpo acumular ou reter calor (capacidade térmica (C), condutividade térmica (K) e inércia térmica (P)) (WATERS et al., 2002).

O balanço energético em uma cidade e seus fatores determinantes podem ser entendidos a partir da distribuição espacial da temperatura da superfície da terra (TS), que pode ser usada como indicadora da eficiência térmica e energética. A TS influencia os fluxos de ar nas camadas mais baixas da atmosfera, resultando em condições de microclima dentro e fora dos edifícios, o que afeta diretamente o conforto humano (VOOGT; OKE, 2003). Quanto mais próxima a temperatura da superfície da temperatura do ar, menor a transmissão de calor ao ambiente por convecção, condução e radiação (PRADO; FERREIRA, 2005).

2.2 Métodos para análises do clima urbano

O sistema climático urbano é um sistema dinâmico e complexo, que pressupõe ampla interação dos fatores que influenciam o balanço de energia nas superfícies e promovem a retroalimentação do sistema climático urbano (LI et al., 2013). Segundo Oke et al. (2017) as métricas utilizadas para análises do clima urbano podem ser realizadas a partir de observações em campo, observações por sensores remotos, modelos físicos, modelos numéricos e modelos empíricos.

O desenvolvimento dos estudos climáticos urbanos é amparado nos princípios da física urbana, que é a disciplina, que contempla a integração de dados em diferentes campos das ciências: física, química ambiental, aerodinâmica, meteorologia e estatística. De acordo com Moonen et al. (2012), as três principais linhas de pesquisa, aplicadas a estudos do sistema climático urbano, são complementares e concentram-se em métodos baseados em medições em campo, medições de túneis de vento e simulações numéricas baseadas na dinâmica dos fluidos. As medições em campo e medições de túnel de vento auxiliam na construção de

modelos empíricos e de modelos numéricos. Os resultados dos experimentos em campo servem para alimentar modelos numéricos e validar informações obtidas por simulações, contemplam a aferição de dados meteorológicos, obtidos em estações fixas ou móveis. Já as medições dos túneis de vento auxiliam para determinar a carga de vento sobre as edificações, verificar o desconforto gerado pela passagem do vento entre edificações e áreas adjacentes à edifícios altos, e na análise da dispersão de poluentes e calor em áreas urbanas. As simulações numéricas são desenvolvidas com base em modelos tridimensionais, que incorporam as condições meteorológicas e o do detalhamento dos fluxos de calor que influenciam o balanço de energia nas superfícies. Os modelos numéricos permitem modelar as superfícies urbanas com um nível maior de detalhes, bem como facilitam contabilizar informações de grandes base de dados, e acoplar resultados em diferentes escalas de espaço e tempo (MOONEN et al., 2012).

As observações em campo podem ser provenientes de estações meteorológicas, sensores remotos ou transectos (fixos ou móveis). Os dados das estações meteorológicas tradicionais contemplam séries históricas, são largamente utilizados na maioria das pesquisas sobre o clima urbano, porém são dados pontuais, que representam o clima em meso escala, limitando as análises de tecidos heterogêneos como áreas urbanas. Em contraposição, os dados obtidos por transectos ou estações de medição fixos e transectos móveis, auxiliam no detalhamento de dados meteorológicos numa maior resolução espacial. Os transectos fixos, tem seus dados aferidos a partir de locais pré-estabelecidos ou amostras e os transectos móveis tem seus dados obtidos em percursos, através de áreas amostrais, por meios de veículos como automóveis, bicicletas etc. Nas medições por transectos móveis os equipamentos de medição são instalados de modo a garantir o isolamento térmico entre o meio de transporte e o sensor de medição para evitar interferência nos dados medidos (LUCENA, 2019).

A escolha para localização dos pontos, para realizar as medições em campo, deve se basear na classificação dos sistemas urbanos e áreas de interesse, para identificação das zonas climáticas homogêneas e áreas de transição (OKE, 2006).

Um estudo realizado com transectos móveis na cidade de Adelaide, na Austrália, constatou que as diferenças de temperatura no meio ambiente urbano, variam em distâncias inferiores a 1 quilometro, que podem ser percorridas a pé. Os estudos concluem, através de análises de correlação, que as ilhas de calor são mais intensas onde não se observa a presença de árvores, que promovem o resfriamento evaporativo e sombras. Destaca, que na área de estudos onde o clima é temperado, a proporção de cobertura de arborização, ideal para promover o resfriamento é em torno de 30% e que a inserção de vegetação e um desenho urbano que considere a capacidade de resfriamento da água, pode contribuir para a redução de aproximadamente 2°C na temperatura do ar (SOLTANI; SHARIFI, 2017).

As análises e simulações voltadas para a compreensão da dinâmica do clima urbano são feitas a partir de modelos físicos, numéricos e empíricos, que permitem simular as interações que influenciam as condições meteorológicas nas áreas urbanas. O uso de modelos auxilia na produção de informações em diferentes escalas de abrangência e áreas de pesquisa: conforto

térmico, eficiência energética, mudanças climáticas entre outros. Os modelos físicos se baseiam em experiências em laboratórios e ao ar livre; os modelos empíricos nas relações estatísticas obtidas pela observação de dados e relações entre diferentes sistemas; e os modelos numéricos são baseados em simulações computacionais com base na dinâmica dos fluidos (OKE et al., 2017).

O uso de um modelo empírico, utilizado para o estudo do clima urbano, na cidade de Montes Claros, Minas Gerais, Brasil, constatou que o comportamento climático das áreas urbanas não pode ser analisado de maneira isolada, e sim pela associação entre as variáveis que compõe o sistema climático urbano. O estudo foi desenvolvido a partir de dados observacionais, medidos em 11 amostras, com diferentes condições ambientais e urbanísticas, e análises de correlação entre os resultados das medições e parâmetros urbanísticos de cada amostra. Os dados medidos foram: a temperatura do ar e umidade; e os parâmetros urbanísticos utilizados nas análises de correlação foram: fator de céu visível, densidade construída, cobertura de vegetação e área impermeável. Os parâmetros urbanísticos foram obtidos através da interpretação de imagens do satélite Ikonos e as medições em campo, utilizando-se um *datallogger* em pontos fixos, através do qual os dados forma medidos de maneira contínua e simultânea nos meses de Janeiro, Julho e Setembro do ano de 2007. Os resultados permitiram concluir que: as maiores diferenças de temperatura entre centro e periferia ocorreram no período da tarde, estendendo-se para o período noturno; o aquecimento noturno é mais influenciado pelo fator de céu visível do que pela densidade construída; a impermeabilização do solo contribui para a diminuição da umidade, principalmente nos períodos secos; a presença da vegetação em áreas densamente construídas promove a redução das temperaturas noturnas e promove um efeito localizado, contribuindo para o aumento de umidade, principalmente nos períodos secos. Os autores relatam que o método empírico utilizado, forneceu informações úteis para o planejamento urbano, porém fazem-se necessários estudos complementares para o desenvolvimento de critérios urbanísticos mais específicos, o que pode ser feito utilizando-se modelos numéricos e dados climáticos em simulações (GOMES; LAMBERTS, 2009).

É importante ressaltar que apesar de sua utilidade, os dados obtidos por experimentos em campo, tuneis de vento ou modelos físicos, nem sempre são suficientes para explicar a dinâmica do clima urbano em sua complexidade, porém trazem informações de ordem pontual que podem servir de base para análises complexas e simulações, com base nos princípios da similaridade. O uso de modelos numéricos e empíricos integrados a sistemas de informação geográficas (SIGs) permitem integrar base de dados multidisciplinares (ex. imagens de satélites, dados sócio econômicos, dados climáticos), em diferentes escalas de espaço e tempo.

Os modelos climáticos, utilizados para realizar análises, previsões e simulações em áreas urbanas, são modelos numéricos fisicamente embasados. Esses modelos são utilizados para realizar previsões climáticas e avaliar o impacto da urbanização em diferentes escalas espaciais. Na meso escala, cuja abrangência é dada a partir de quilômetros, os modelos

numéricos podem ser utilizados para avaliar a resiliência e adaptação das áreas urbanas às mudanças climáticas globais, a influência das áreas urbanas no clima regional, condições atmosféricas ou emissões relacionadas.

Os modelos climáticos de meso escala, auxiliam na simulação dos fenômenos meteorológicos em áreas extensas, pois permitem incorporar uma grande quantidade de informações. Esses modelos podem ser alimentados por informações obtidas por satélites, séries temporais de estações meteorológicas ou base de dados locais. Nesses modelos as informações sobre as superfícies urbanas são acopladas em forma de modelos “complementares” ou subcamadas, onde são inseridos os parâmetros necessários para computar os fluxos de energia, dadas as características das superfícies. O uso de séries temporais é utilizado quando se pretende realizar análises de impactos, identificar tendências ou simular cenários, principalmente quando se pretende realizar análises relacionadas à mudanças climáticas globais (LUCENA, 2019).

As observações da superfície terrestre feitas por sensores remotos, também são muito utilizadas para a consolidação dos modelos numéricos e modelos empíricos, pois auxiliam na obtenção dos dados necessários para consolidação de modelos e simulações. No sensoriamento remoto da superfície terrestre as informações são adquiridas de forma automática, a partir da interação entre a superfície, atmosfera e radiação proveniente da Terra e do Sol (Apêndice A).

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) a análise do impacto da morfologia urbana na temperatura das superfícies, no período noturno e diurno, em diferentes ZCLs, foi feita com base em imagens diurnas e noturnas do sensor MODIS, do ano de 2016, cuja resolução original de 250 metros foi ampliada para 100 metros. Os resultados demonstraram que durante o dia, as áreas classificadas como ZCL3, onde observaram-se construções compactas de pequeno porte em áreas sem vegetação, apresentaram a maior TS mediana, e que durante a noite as áreas classificadas como ZCL1, onde observaram-se edificações verticais associadas a áreas sem vegetação, apresentaram as maiores TS medianas. Os resultados também apontaram que as áreas classificadas como ZCL4, onde observaram-se edificações verticais associadas a vegetação e espaços abertos, e áreas classificadas como ZCL9, onde observaram-se edificações esparsas intercaladas por vegetação em áreas predominantemente permeáveis, apresentaram as menores TS medianas no período diurno e noturno, levando a concluir que a vegetação e sombra, contribuem para a redução da TS nestas ZCLs (FERREIRA; DUARTE, 2019, 2018).

Análises realizadas para avaliar o impacto do aumento da área urbanizada, população e calor antropogênico no microclima da cidade de Manaus e região, observando as alterações climáticas através de um modelo atmosférico de meso escala, concluíram que houve aumento da temperatura, diminuição do conteúdo de água na atmosfera, alterações na circulação das brisas e aumento da intensidade de chuvas nas áreas urbanizadas (SOUZA; ALVALÁ; NASCIMENTO, 2016). Os estudos foram realizados utilizando o modelo de balanço de energia *Town Energy Budget* (TEB) (MASSON; GRIMMOND; OKE, 2002), que

é voltado para aferir o fluxo de calor nas áreas urbanas a partir da geometria do canyon urbano, acoplado ao modelo de meso escala *Brazilian Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS) (INPE, [s.d.]) (SOUZA, 2012).

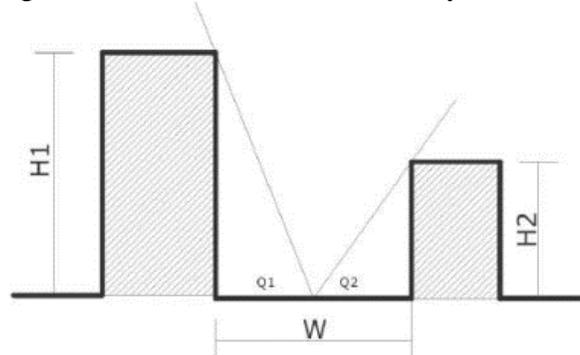
Os modelos numéricos de meso escala também são utilizados para realizar previsões futuras por simulações, quando são utilizados para realizar previsões climáticas que irão influenciar os ecossistemas ou as condições meteorológicas. Kim H., et al. (2016) avaliaram o impacto do crescimento futuro da população nas mudanças climáticas na região metropolitana de Seul na Coreia do Sul. O modelo utilizado para realizar as análises climáticas e as simulações foi o *Weather Research Forecast* (WRF) (SKAMAROCK; KLEMP, 2008) e o modelo utilizado para realizar as projeções no crescimento urbano foi o SLEUTH (*Slope, land use, exclusion, urban extent, transportation and hill shade*) (CLARKE, 2008). A resolução espacial da grade utilizada foi de 40km. Os resultados apontaram que a ampliação das áreas urbanizadas na região metropolitana de Seul levaram a alterações no padrão de distribuição da temperatura na superfície e influenciou a circulação de vento no centro da cidade (KIM et al., 2016).

Na microescala, cuja abrangência espacial é dada a partir de milímetros até uma centena de metros, os modelos numéricos são utilizados para avaliar a influência das edificações no clima urbano, bem como a influência do clima urbano no conforto térmico humano, na demanda de energia em edificações, mudanças climáticas localizadas, emissões de poluentes, identificar áreas de risco e produzir informações para o planejamento urbano.

Uma análise em microescala, utilizada para avaliar a influência da ampliação da vegetação, do albedo e do fator de forma (H/W) no desempenho térmico do canyon urbano, utilizando um modelo tridimensional de alta resolução espacial, foi feita no sentido de comparar a eficiência das variáveis escolhidas (vegetação, albedo e fator de forma) em cidades com climas distintos: Campinas no Brasil, com clima temperado quente com invernos secos e verões quentes (Cwa, segundo a classificação Koppen), e Mendoza na Argentina, com clima desértico frio (BWk, segundo a classificação Koppen) (ALCHAPAR et al., 2017).

O fator de forma (Figura 2.3) é definido pela razão entre alturas das edificações (H) e o espaçamento entre elas (W), é a grandeza tridimensional utilizada para representar o espaçamento entre as edificações, refere-se ao volume de ar delimitado pelo solo e as paredes entre dois edifícios adjacentes, e as inter-reflexões que ocorrem nas superfícies, que resultam em microclimas particulares. Quanto menor o fator de forma, menor o impacto dos fluxos de ar produzidos por uma edificação na outra (BARBIRATO; TORRES; SOUZA, 2011).

Figura 2.3 - Fator de Forma ou Canyon Urbano



Fonte: Barbirato, Torres e Souza (2011).

A análise em microescala foi feita com base em simulações e dados das estações meteorológicas locais. As simulações foram feitas utilizando-se o programa ENVI-met. 3.1, com resolução espacial tridimensional de 3 x 3 x 3 metros, numa área de estudos com 210 x 210 metros. Os resultados das simulações permitiram concluir que: (1) o aumento da vegetação de 0 para 60% pode diminuir a temperatura média do ar em Campinas em 3,9°C e em Mendoza 1,7°C; (2) o aumento do albedo em Campinas auxilia na redução na temperatura do ar, que pode chegar a 1,3°C e em Mendoza 0,7°C e (3) o aumento do fator de forma em Campinas, pode reduzir a temperatura do ar na maioria dos cenários testados, porém em Mendoza não produziu efeito similar, sendo que em dos 9 cenários testados, apresentou redução da temperatura do ar somente em 2 deles. Em todos os cenários concluiu-se que o aumento das áreas de sombra e da massa térmica das edificações pode contribuir para a redução da temperatura do ar nos espaços exteriores (ALCHAPAR et al., 2017).

A utilização de imagens ou fotográficas das superfícies terrestres, embora não consigam explicar em sua magnitude os processos climáticos nas áreas urbanas, dada à baixa resolução espacial de alguns sensores, auxiliam na compreensão das relações espaciais e quantificação dos processos ecológicos. O uso de imagens obtidas por sensores remotos, cada vez mais, contribui para o desenvolvimento de métricas baseadas na Ecologia da Paisagem e indicadores sócio ambientais. As métricas definidas pela Ecologia da Paisagem enfatizam a relação entre os padrões espaciais de uso e ocupação do solo e os processos ecológicos. As imagens obtidas por satélites podem ser utilizadas como a representação digital da paisagem, para a construção de modelos espaciais, com a vantagem de fornecer informações georreferenciadas, em diferentes escalas de espaço e tempo (CHUVIECO; HUETE, 2010).

Os modelos espaciais, geográficos ou modelos espacialmente explícitos são modelos empíricos, elaborados com bases na estrutura que estabelece relações espaciais entre os componentes da paisagem (CHUVIECO; HUETE, 2010). Esses modelos auxiliam no entendimento dos padrões de mudança de uso e cobertura do solo e são análogos à ecologia da paisagem. Neste tipo de modelo as relações espaciais são estabelecidas a partir do conceito de dependência espacial, partindo do princípio de que as ocorrências sociais e ambientais se

dão de acordo com a distância (TOBLER, 1979). Permitem integrar informações multidisciplinares em diferentes escalas de espaço e tempo e aferir dados de ordem qualitativa e quantitativa (VERBURG et al., 1999).

Nos modelos espaciais, a representação do espaço geográfico pode ser feita por uma grade regular ou espaço celular (CS), e cada região da superfície é associada a um atributo, o que permite estabelecer a relação entre o fenômeno de estudo e os padrões associados ao espaço (DRUCK et al., 2004). Os modelos espaciais podem ser consolidados a partir de dados discretos ou a partir de dados contínuos. Nos modelos espaciais, consolidados a partir de dados discretos, os mapas utilizados são preparados com antecedência, com base em informações sobre o uso e cobertura da terra. Nesse tipo de modelo, os erros de categorização ou classificação dos atributos podem se propagar para as análises espaciais. Nos modelos espaciais consolidados a partir de dados contínuos, a modelagem da paisagem é feita com base em dados biofísicos extraídos de imagens de satélite ou indicadores locais de associação espacial. Na modelagem espacial, utilizando dados contínuos, as mudanças podem ser descritas ao nível de resolução do pixel, preservando o detalhamento das informações e aumentando a qualidade dos resultados (FAN; WANG, 2020).

A representação computacional de dependência espacial é denominada auto correlação espacial, derivada do conceito estatístico de correlação. Sua aferição é feita utilizando-se indicadores globais ou locais, nos quais a dependência espacial é estabelecida considerando-se os valores do atributo numa região e os valores deste mesmo atributo nas regiões vizinhas. Os indicadores globais consistem num valor único calculado para representar a associação espacial de um conjunto de dados numa extensão de área, enquanto os indicadores locais (derivados dos globais) indicam as associações locais, que ocorrem dentro de uma área maior e expressam as relações pontuais e localizadas (DRUCK et al., 2004). Ambos são estabelecidos, dentro de um espaço georreferenciado, considerando-se os valores dos vizinhos mais próximos e definidos a partir da matriz de vizinhança, proximidade ou contiguidade. O conceito de matriz de vizinhança (W), fundamental para a estimativa das associações espaciais, é estabelecido pela proximidade espacial e variabilidade dos dados entre vizinhos, sendo considerado elemento essencial para se estabelecer as relações espaciais (ANSELIN, 2005; GEODA, [s.d.]).

Nas análises de auto correlação espacial, os testes de significância estatística, devem ser aplicados no sentido de testar a significância dos índices medidos, que devem corresponder a um “extremo” da distribuição simulada, para que seja descartada a hipótese nula de independência espacial. Em amostras não paramétricas utiliza-se o teste de pseudo significância ou permutação para verificar se os resultados não ocorrem por acaso. Neste teste, simulações computacionais são realizadas, diferentes arranjos espaciais são testados e uma distribuição empírica é gerada (ANSELIN, 2010; DRUCK et al., 2004).

Na cidade de Boise, Idaho, Estados Unidos, um modelo espacial contínuo, com resolução espacial de 270 x 270 metros, foi utilizado para quantificar as variações espaço temporais da TS entre áreas urbanas e rurais, identificar as associações entre mudanças no uso do solo e

TS e identificar mudanças climáticas associadas a padrões de urbanização com o objetivo de propor medidas de adaptação e mitigação, para o desenvolvimento de políticas urbanas. O modelo foi consolidado a partir de dados das imagens do satélite *Landsat*, obtidas para os anos de 2001, 2008 a 2013, através das quais foram calculados os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (CARLSON; RIPLEY, 1997), índice de áreas construídas por diferença normalizada (NDBI) (ZHA; GAO; NI, 2003) e temperatura das superfícies. Os métodos estatísticos utilizados para avaliar as relações espaciais foram: o índice de *Moran* (I) (MORAN, 1950) e o índice Getis-Ord (G) (GETIS; ORD, 1992). Os resultados obtidos permitiram concluir que: (1) o crescimento da área urbanizada ocorreu em detrimento das áreas cultivadas, (2) o aquecimento das áreas urbanizadas foi superior ao resfriamento das áreas verdes, apontando para a necessidade de ampliação de áreas verdes em meio às áreas urbanizadas e (3) a descontinuidade ou dispersão de agrupamentos ou *clusters* de vegetação e áreas construídas favorecem a redução das TS, sendo estas informações úteis para o desenvolvimento de políticas urbanas voltadas para reduzir o aquecimento das áreas urbanas (FAN; WANG, 2020).

A avaliação de diferentes métricas para investigação do clima urbano, concluiu que as análises mais abrangentes foram obtidas através do uso combinado de diferentes técnicas. Essa discussão foi possível graças a comparação dos resultados obtidos por 4 diferentes métodos, num estudo realizado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). A pesquisa avaliou resultados obtidos pela análise de séries históricas das estações meteorológicas na área de estudos; medições por transectos móveis e fixos; estimativas por sensoriamento remoto, utilizando imagens do satélite *Landsat*; e simulações utilizando o modelo de meso escala *Meso Escala Model 5* (MM5), entre 2007 e 2010, utilizando os dados meteorológicos do modelo *Global Forecast System Model do National Center for Environmental Predictions* (NCEP), com resolução espacial variando de 27 a 1 Km (LUCENA, 2019).

Alguns pesquisadores descrevem que as dificuldades associadas ao uso de modelos numéricos, voltados para estudos urbanos nas diferentes escalas do clima urbano, estão associadas à dificuldade para realizar às formulações dos parâmetros. Os modelos atmosféricos, por exemplo, necessitam de uma representação detalhada das variáveis que afetam as trocas de calor nas áreas urbanas, que são extremamente heterogêneas, e na atmosfera acima dela. Nesse contexto os autores relatam a necessidade de desenvolvimento de métricas de aferição, que possam prover informações com maior resolução espacial, de modo a representar as características das áreas urbanas com um maior nível de detalhe (LUCENA, 2019; MASSON et al., 2020; SOUZA, 2012).

Portanto, para o estudo da dinâmica climática urbana e seus fatores associados, de forma mais precisa, os resultados obtidos através da utilização das técnicas e ferramentas acima descritas, devem ser analisados de forma integrada, para obtenção de dados em diferentes escalas de espaço e tempo, dado a complexidade e variabilidade do sistema climático urbano.

2.3 Fatores associados ao desempenho térmico e energético de superfícies urbanas

2.3.1 Calor antropogênico nas zonas climáticas locais

Os fluxos de calor antropogênico variam de cidade para cidade e são influenciados pelo consumo de energia per capita, densidade da população, condições meteorológicas e clima. Podem variar entre 10 W /m^2 em áreas residenciais com baixa densidade demográfica até 1500 W /m^2 para áreas comerciais com alta densidade (QUAH; ROTH, 2012).

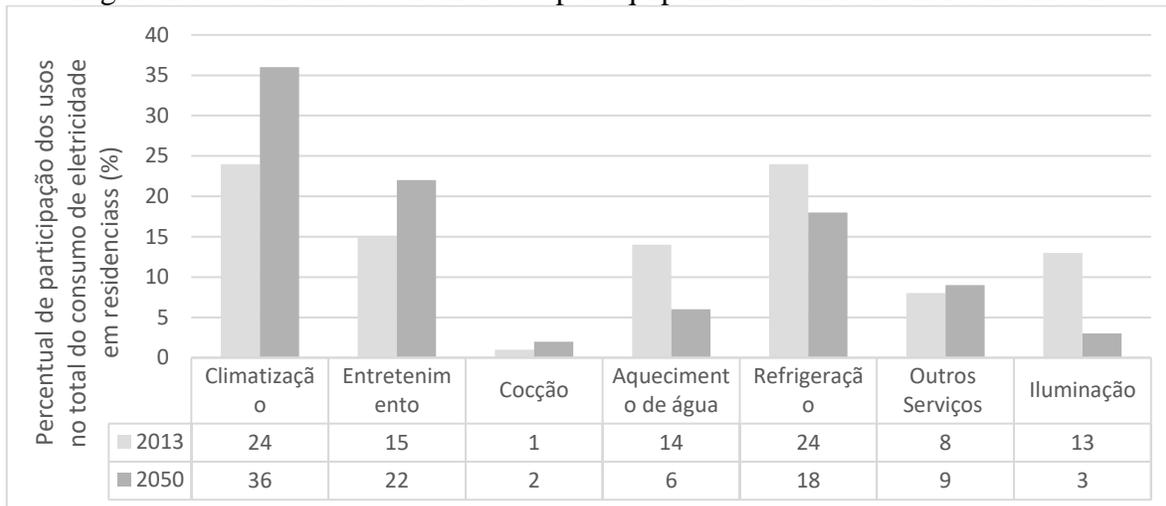
O dimensionamento do calor antropogênico, em áreas urbanas, deve ser feito a partir da soma do calor produzido por quatro setores: o setor das edificações, o setor industrial, o de transportes e o setor que representa o metabolismo humano, que é o menos importante. De maneira simplificada, pode-se dizer que o calor antropogênico (Q_f) pode ser calculado a partir do consumo de energia, pois a maneira como a energia é utilizada influencia na quantidade de calor antropogênico gerado (SAILOR, 2011; SHAHMOHAMADI et al., 2011).

No mundo, considerando todas as formas de energia produzidas, o setor de edificações foi responsável pelo consumo de 34%, o setor de transportes 28% e o setor industrial 27%, estas estimativas foram elaboradas com base nos dados de 2005, que também aponta para a variabilidade no percentual do consumo, que ocorre em função do grau de desenvolvimento de cada país (GEA, 2012).

No Brasil, o setor de edificações, que é o foco desta pesquisa, demanda 14% do total de energia produzida e 47% da eletricidade. Grande parte das políticas, que envolvem o setor de edificações, voltadas para promover a redução das emissões de gases de efeito estufa, estão associadas à metas de diminuição de consumo de energia e ampliação da eficiência energética em edificações e equipamentos (EPE, 2014). Entre as políticas voltadas para promover a eficiência energética em edificações destacam-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) (INMETRO, [s.d.]) e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (MME, [s.d.]), cujas diretrizes estabelecem critérios para ampliação e avaliação do desempenho energético dos equipamentos e materiais que compõe as envoltórias das edificações. A Empresa de Planejamento energético brasileiro (EPE) sugere que a avaliação dos impactos dados as edificações devem ser feitos considerando-se condicionantes ambientais, construtivas e de uso (EPE, 2014).

No setor residencial brasileiro, cenários apontam que em 2050, o maior aumento de demanda será para o uso de equipamentos para climatização, o que corresponderá a aproximadamente 36% da demanda dos domicílios (Figura 2.4) (EPE, 2014).

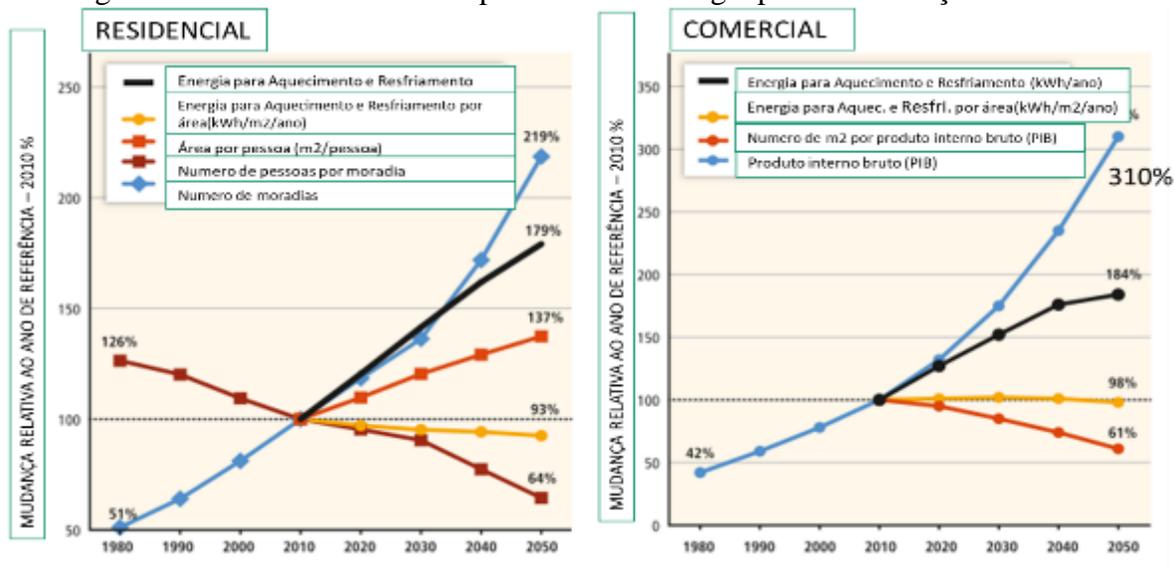
Figura 2.4 - Consumo de eletricidade por equipamentos em residências no Brasil.



Fonte: Adaptado de: EPE (2014)

No mundo, a previsão de crescimento do uso de energia para climatização dos edifícios é de 79% para o setor residencial e 84% para o setor comercial no período de 2010 a 2050 (Figura 2.5) (LUCON et al., 2014).

Figura 2.5 - Tendência mundial para o uso de energia para climatização artificial.



Fonte: Lucon et al. (2014), traduzido.

O consumo de energia por habitante varia bastante em função do nível de desenvolvimento econômico de cada país (Tabela 2.2). Os Estados Unidos (1473 Watts/habitante.ano) e Alemanha (799 Watts/habitante.ano) por exemplo, tiveram em 2015, um consumo anual de

energia cinco e três vezes maior que o consumo de energia por habitante no Brasil (285 Watts/habitante.ano) (IEA, 2020).

Tabela 2.2 - Consumo de energia por habitante (Watts/hab.ano)

Local	Consumo de energia por habitante em 2015 em (Watts/habitante.ano)
Inglaterra	582
Alemanha	799
Portugal	548
China	468
Índia	103
Estados Unidos da	1473
Brasil	285
Austrália	1142
África do Sul	468

Fonte: IEA (2020).

As altas temperaturas e a baixa qualidade do ar urbano, muitas vezes acentuadas pelas ondas de calor, afetam a saúde, o bem-estar e a produtividade da população. O excesso de calor causa desconforto respiratório, exaustão, insolação não fatal e mortalidade relacionada ao calor, afetando principalmente as crianças, idosos, e pessoas com saúde debilitada, visto que em alguns casos o corpo humano é incapaz de resfriar-se (HABEEB; VARGO; STONE, 2015).

O excesso de calor ou frio altera o metabolismo dos humanos e quando o homem não consegue obter conforto a partir dos recursos naturais, o mesmo utiliza sistemas de climatização artificial, contendo reguladores de temperatura e umidade, para controlar a condição climática nos ambientes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Os sistemas para climatização voltada para o resfriamento artificial em edifícios são responsáveis por emissões de gases fluorados (F-gases), dado o uso de equipamentos e sistemas de resfriamento, sendo responsáveis por um oitavo a um terço, do total das emissões globais, dependendo da convenção utilizada para aferição (LUCON et al., 2014).

Os gases fluorados ou F-gases: hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆), são substâncias químicas artificiais produzidas pelo homem e utilizadas em diversos setores e aplicações no setor de refrigeração e climatização artificial também utilizados como solventes e isolantes térmicos. Foram introduzidos a partir de 1990 desde a proibição dos clorofluorcarbonos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) pelo protocolo de Montreal (1987), que são substâncias nocivas responsáveis pela destruição da camada de Ozônio (O₃). Os gases fluorados, além de deteriorarem a camada de Ozônio, contribuem para as mudanças climáticas, dado seu alto potencial de aquecimento global

(GWP), que são milhares de vezes maiores que o do dióxido de carbono. O potencial de aquecimento de um gás (GWP) é utilizado como parâmetro para aferir seu impacto no aquecimento da atmosfera no período de 100 anos comparando-se 1kg do gás avaliado a 1kg de dióxido de carbono (CO₂). Por exemplo, o gás fluorado hidrofluorcarbono 125 (HFC-125), que possui o GWP de 3500 e o hexafluoreto de enxofre (SF₆) com GWP de 22800 são respectivamente 3500 e 22800 vezes mais potentes que o CO₂, tornando-se necessária a prevenção de sua liberação na atmosfera (GSCHREY; ZEIGER, 2015).

O uso de sistemas para climatização e refrigeração artificial resulta no aumento das emissões de poluentes e calor para o ar externo (BRETZ; AKBARI; ROSENFELD, 1998). O sistema climático urbano é influenciado pelo uso de sistemas para climatização artificial. Estes sistemas interferem na dinâmica dos sistemas ambientais, pois alteram o balanço de energia no espaço urbano e adjacente, o que contribui para a intensificação do fenômeno de aquecimento das áreas urbanas denominado ilhas de calor urbana (ICU).

O calor retirado dos ambientes internos, por sistemas mecanizados, e a poluição gerada pela demanda de energia do processo de climatização, retornam então às áreas externas, amplificando as temperaturas no ambiente e conseqüentemente a demanda de energia para climatização, produzindo assim um efeito de retroalimentação positiva do sistema. Nos processos de retroalimentação positiva, uma parte da saída da ação de um sistema, retorna para a entrada, realimentando o sistema e atuando para estimular ainda mais o processo. No caso de retroalimentação negativa, parte da produção é subtraída da entrada e atua para mitigar o fenômeno (MCGUFFIE; HENDERSON-SELLERS, 2014).

O resfriamento natural das superfícies urbanas, principalmente em países de clima predominantemente tropical como o Brasil, pode ser utilizado para produzir o efeito de retroalimentação negativa do sistema climático urbano. A retroalimentação negativa do sistema climático urbano ocorre através dos processos de atenuação do calor, que melhora o desempenho térmico e energético das áreas urbanas, o que deve ser feito sem comprometer o conforto ambiental e considerando a variabilidade sazonal climática.

A retroalimentação negativa do sistema climático urbano pode ser alcançada a partir do uso de uso de tecnologias solares passivas, que podem ser incorporadas no tecido urbano, que são o foco desta pesquisa, bem como através do uso de energias renováveis, o que não será abordado nesta pesquisa. A Figura 2.6 apresenta o fluxograma simplificado que resume o sistema de retroalimentação do sistema climático urbano e os mecanismos associados a ampliação ou atenuação das ilhas de calor urbanas e mudanças climáticas globais.

Figura 2.6 - Mecanismos de retroalimentação do clima urbano.



Fonte: Produção do autor.

2.3.2 Tecnologias passivas

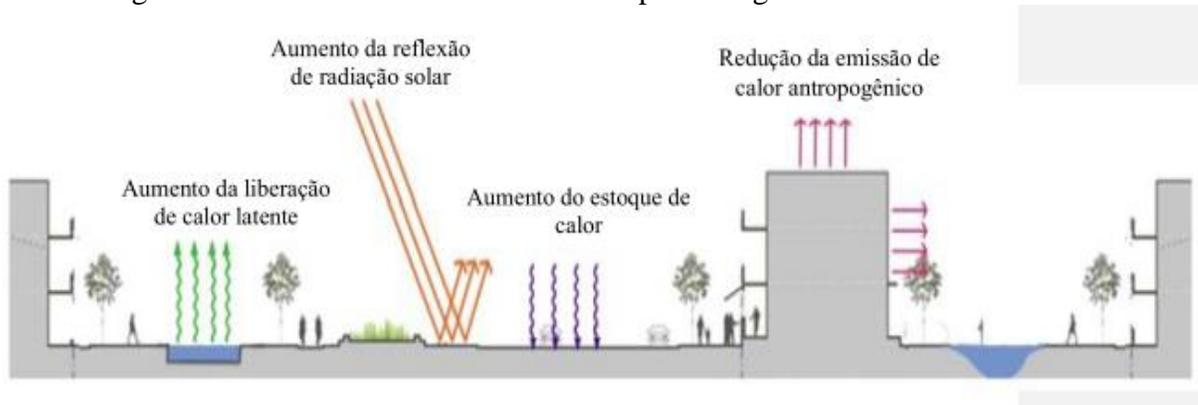
As tecnologias passivas contemplam estratégias e técnicas que não utilizam meios mecânicos artificiais ou que demandam energia para seu funcionamento, pois a energia térmica é transmitida naturalmente por condução, convecção e radiação (MOITA, 2010). Seus princípios se baseiam nos princípios da Arquitetura Bioclimática cuja concepção se baseia na ciência da arquitetura, especialmente energética, que rejeita os ambientes desumanos e o desperdício de energia, buscando atender as necessidades básicas do ser humano, através do emprego de tecnologias apropriadas, dadas pelas condições socioeconômicas de cada local, em dadas condições climáticas (SZOKOLAY, 1998).

Em áreas urbanas, o uso da vegetação e de materiais ou superfícies adequados ao clima local, em coberturas e pavimentos urbanos, são tecnologias passivas, que podem ser utilizadas como estratégias, para reduzir as temperaturas em cidades. Entre os efeitos diretos e indiretos do uso da vegetação e de materiais construtivos mais eficientes estão: o aumento do conforto térmico humano nas cidades (dada a redução das temperaturas), a melhora da qualidade do ar (dada a diminuição dos efeitos fotoquímicos, que elevam os níveis de Ozônio (O₃) na superfície), a redução do consumo de energia para o resfriamento de ar no verão em edificações (dada a diminuição da carga térmica absorvida pelas edificações) e redução da demanda de geração de energia elétrica e emissões de gases de efeito estufa a ela relacionadas (AKBARI et al., 2015).

No contexto urbano, o uso de tecnologias passivas voltadas para a mitigar as ICU e ondas de calor, pode ser abordado a partir de técnicas construtivas que utilizam os conceitos de infraestruturas “verdes”, “azuis” e “cinzas”. Este conceitos contemplam técnicas construtivas

que são implementadas na construção de infraestrutura urbana com o objetivo de resfriar as superfícies, promover a sustentabilidade ambiental e energética e mitigar os efeitos das ilhas de calor urbanas. Entre os mecanismos de resfriamento, que podem ser utilizados para mitigar os efeitos das ICU estão: a redução das emissões de calor antropogênico das edificações, o uso da água para promover os fluxos de calor latente, o uso de superfícies com maior capacidade de refletir a radiação solar e o aumento da capacidade de estoque de calor das estruturas urbanas (Figura 2.7) (Qi et al., 2019).

Figura 2.7 - Mecanismos de resfriamento para mitigar os efeitos das ICU.



Fonte: Qi et al. (2019), traduzido.

A redução das emissões de calor antropogênico pelos edifícios, pode ser alcançada a partir da implementação de sistemas construtivos com maior eficiência energética, associados às mudanças de hábitos e ao uso de equipamentos com maior rendimento. As iniciativas para promover a redução da demanda de energia em edifícios, está atrelada ao estabelecimento de padrões mínimos de desempenho, que estabelecem critérios para a construção da envoltória das edificações e para equipamentos dos sistemas de climatização artificial e iluminação (EPE, 2014). A aplicação do conceito de eficiência energética em edifícios e sistemas construtivos pode contribuir para a redução de 30% do consumo de energia em edificações existentes, submetidas à *retrofit*, até 50% em edificações concebidas com esse objetivo (PROCEL, 2013). A redução do consumo de energia consequentemente contribui para a redução da emissão de calor antropogênico.

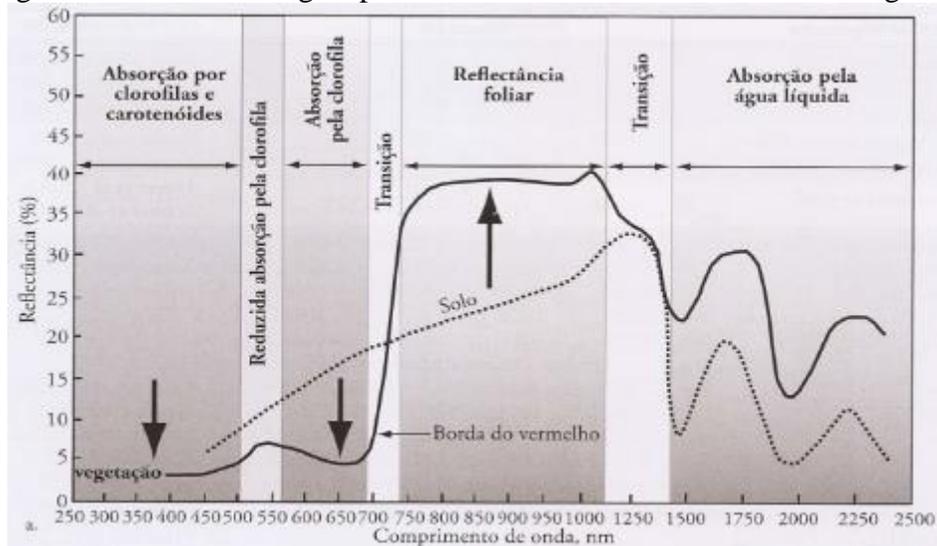
A ampliação dos fluxos de calor latente podem ser obtidas através do uso das infraestruturas “verdes” e “azuis”, que preconizam a utilização dos serviços ecossistêmicos da vegetação e da água no ambiente, para promover o resfriamento das áreas urbanas, o sequestro de carbono e a sustentabilidade nas cidades.

As infraestruturas “verdes” consistem em infraestruturas naturais vivas, como áreas verdes, florestas urbanas, telhados e muros vegetados, jardins e outros elementos que compõe a paisagem urbana (Qi et al., 2019). A capacidade de resfriamento da vegetação, considerada infraestrutura verde, está associada a sua capacidade de absorver parte da radiação solar visível, que é utilizada no processo de fotossíntese, capacidade de produzir sombreamento,

capacidade de utilização de energia térmica no processo de evapotranspiração das plantas, contribuindo para o aumento da umidade do ar e para a redução dos índices de poluição do ar e sequestro de carbono (SANTAMOURIS et al., 2018).

A imagem da Figura 2.8 apresenta a curva de refletância da vegetação, onde é possível observar que as moléculas ou pigmentos de uma planta verde típica, absorvem preferencialmente comprimentos de onda na região espectral do visível (350 a 700 nm). (JENSEN, 2009).

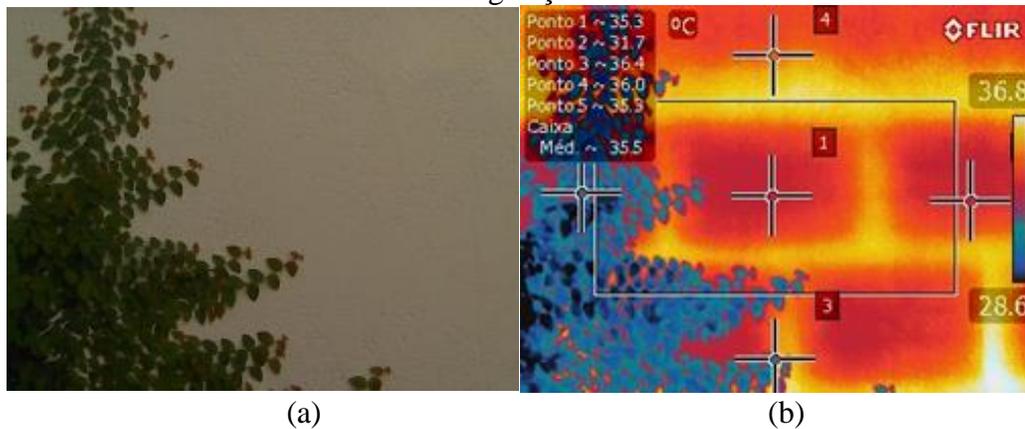
Figura 2.8 - Base fisiológica para o desenvolvimento de Índices de Vegetação



Fonte: Jensen (2009).

A imagem da Figura 2.9 mostra uma imagem fotográfica e uma termográfica de um muro que está parcialmente coberto por vegetação. As imagens fotográficas são obtidas através dos comprimentos de onda no intervalo de comprimento de onda Visível, enquanto as imagens termográficas são obtidas através de comprimentos de ondas no intervalo do infravermelho entre 7500 nm e 14000 nm. As imagens termográficas são utilizadas para medir a TS, identificar focos de calor e altas temperaturas em sistemas construtivos, bem como falhas em sistemas de isolamento térmico (FLIR, [s.d.]). Na Figura 2.9 é possível observar que nas áreas onde a vegetação já cobriu o muro, a TS é de aproximadamente 32°C, enquanto que na superfície, onde o muro em bloco de cimento está exposto, a TS é em torno de 35°C. Nesta imagem pode-se observar que a alvenaria em bloco de cimento, que compõe o muro, possui vãos internos preenchidos com ar, o que lhe garante uma TS inferior ao da argamassa de assentamento dos blocos.

Figura 2.9 - Imagem visível (a) e termográfica (b): TS em muro parcialmente coberto por vegetação



Fonte: Produção do autor.

As infraestruturas “azuis” incluem as áreas alagadas, rios, lagos, espelhos d’água entre outros elementos, que utilizam a água para o processamento e retenção do calor em áreas urbanas (QI et al., 2019). As infraestruturas azuis, no ambiente urbano são utilizadas para reestabelecer o processo natural de alimentação dos lenções freáticos e garantir a percolação de água no solo, diminuindo o risco de enchentes. As infraestruturas azuis também favorecem a redução da temperatura do ar e das superfícies, bem como favorecem o aumento dos índices de umidade, que ocorrem dados os processos de evaporação da água. A água presente na superfície influencia os fluxos de calor latente e promove o resfriamento das áreas urbanas nos períodos quentes, dada à sua alta capacidade térmica (C). A água é a substância conhecida com o maior calor específico (c) (WATERS et al., 2002).

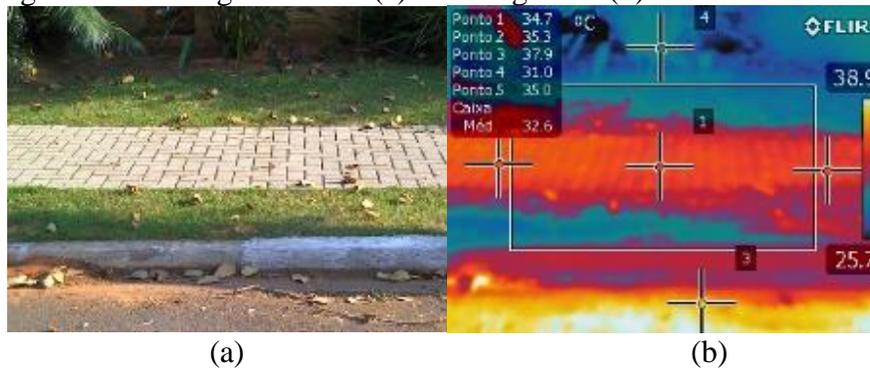
O uso combinado da vegetação associado a ampliação das áreas de drenagem, pode ser vista como uma alternativa para a melhoria das condições de conforto térmico ao ar livre e como um passo importante para alcançar a sustentabilidade em cidades. O sombreamento de áreas públicas e privadas é essencial para mitigar o estresse térmico e melhorar o conforto térmico humano (ABREU-HARBICH; LABAKI; MATZARAKIS, 2015). Os oásis criados pelas áreas verdes podem ficar entre 2-8°C mais frios que seus arredores (TAHA, 1997).

As infraestruturas “cinzas”, que preconizam o uso de materiais e sistemas construtivos, mais eficientes, podem ser utilizadas para fins de atenuação das ICU e redução do calor antropogênico, contribuindo para a redução da temperatura das superfícies urbanas. As infraestruturas “cinzas” consistem em infraestruturas artificiais criadas pelo homem, que podem ser utilizadas para regular os fluxos de calor em áreas urbanas. As mesmas, são desenvolvidas a partir das características termo físicas dos componentes urbanos, podendo estar associadas as infraestruturas verdes e azuis (QI et al., 2019)

A aplicação prática do uso combinado das infraestruturas verdes, azuis e cinzas, pode ser observada no exemplo da Figura 2.10, que apresenta uma imagem fotográfica e uma imagem

termográfica de uma calçada, desenvolvida com base nos princípios da acessibilidade e sustentabilidade, que é denominada “calçada verde”. No exemplo em questão pode-se observar as diferentes capacidades de resfriamento, onde a superfície coberta por asfalto atinge uma TS de aproximadamente 38°C, a superfície da calçada, em piso de concreto intertravado 35°C, e a área coberta por grama 31°C.

Figura 2.10 - Imagem visível (a) e termográfica (b): TS em via urbana.



Fonte: Produção do autor.

Entre os benefícios que se pode alcançar com a utilização de infraestruturas “verdes”, “azuis” e “cinza”, pode-se citar a ampliação da resiliência urbana frente ao aumento das temperaturas, bem como o controle de enchentes, a alimentação de lençóis freáticos, a melhora da qualidade do ar e da água, e a atenuação das ICU, que entre outros fatores remetem a qualidade de vida nas cidades e na saúde humana (QI et al., 2019).

O uso das infraestruturas “cinzas” para o resfriamento das superfícies urbanas pode ser obtido através do aumento do albedo e emissividade, dos materiais utilizados em pavimentos e envelopes construtivos (coberturas e vedações de edificações), ou através do aumento da capacidade térmica dos elementos que constituem o espaço urbano, de modo que o calor fique estocado nos momentos de pico de temperatura do ar (Tar), sendo descartado posteriormente (QI et al., 2019).

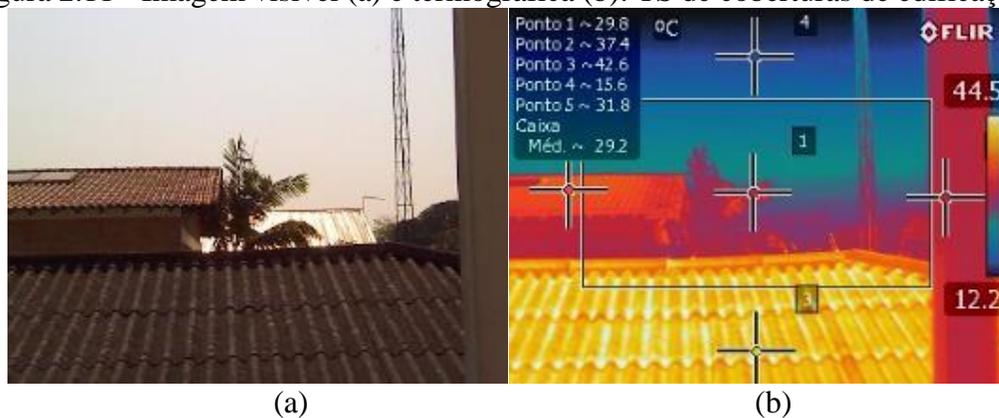
Os materiais com alto albedo ou refletância e emissividade permanecem mais frios que outros, quando expostos à mesma intensidade de radiação solar; são os chamados materiais “frios”. A eficiência destes materiais está relacionada a uma maior capacidade de refletir a radiação solar ou radiação de onda curta, que sobre eles incide, e emitir a radiação de onda longa ou radiação infravermelha (GCCA, 2012).

Em geral o albedo elevado dos materiais é imputado a cores claras, porém somente a cor clara não é indicativa de albedo elevado. As cores claras indicam uma maior refletância no intervalo da radiação solar visível, que representa cerca de 46% da radiação solar que atinge a superfície terrestre, porém o albedo também é resultado da refletância no infravermelho próximo, que representa aproximadamente 43%. Resultados de medições de albedo de materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil, utilizando um espectrofotômetro com esfera integradora mostraram que a cerâmica vermelha, por exemplo, apresentou

refletância em torno de 33% no visível e 78% no infravermelho próximo, o que lhe conferiu uma refletância total ou albedo de aproximadamente 67%, enquanto que telhas de cimento colorido cinza claro e as de fibrocimento apresentam refletância em torno de 34% para o Visível e 37% no Infravermelho próximo, com uma refletância total em torno de 36%. Sendo assim, a cerâmica vermelha tem maior potencial de resfriamento quando exposta à mesma quantidade de radiação solar que os demais materiais (PRADO; FERREIRA, 2005).

A Figura 2.11 apresenta uma imagem fotográfica e uma imagem termográfica, que podem ilustrar o fenômeno acima descrito. A imagem da Figura 2.11, apresenta as medições de TS para três coberturas diferentes. As mesmas estão posicionadas com a mesma orientação em relação ao sol, mas foram construídas com materiais diferentes. A cobertura em fibrocimento atingiu a TS de aproximadamente 43°C, a cobertura cerâmica 37° e a metálica 28°C.

Figura 2.11 - Imagem visível (a) e termográfica (b): TS de coberturas de edificações.



Fonte: Produção do autor.

Simulações numéricas realizadas para avaliar o impacto da ampliação de 10% no albedo de coberturas e pavimentos nas áreas urbanas ao redor do planeta, concluíram que a ampliação, pode produzir um efeito de retroalimentação negativa no sistema climático terrestre, que pode representar em termos globais a compensação de 44 Gt de CO₂ equivalente, que corresponde a mais de um ano das emissões de 37 Gt por ano previstas até 2025 (AKBARI; MENON; ROSENFELD; 2009).

O aumento da capacidade térmica das infraestruturas cinzas, permite que o calor fique estocado nos períodos de pico de temperatura do ar contribuindo para a redução das temperaturas da superfície e do ar. Pode ser alcançado pelo uso dos materiais que mudam de fase no processo de absorção de calor (sólido para líquido; líquido para gás; ou vice-versa), conhecidos como “*phase change materials*” (PCMs) (QI et al., 2019; SHARMA et al., 2009). Esses materiais estocam calor latente no processo de mudança de fase e funcionam como isolantes térmicos, onde o impacto da radiação solar sobre o tecido urbano, que induz no aumento da temperatura das superfícies e da temperatura do ar, é atenuado temporariamente visto que o calor fica retido no processo de mudança de fase dos materiais. A eficiência e

adequação destes sistemas depende da temperatura de fusão dos PCMs utilizados na sua consolidação (QI et al., 2019).

Entre os efeitos diretos e indiretos do aumento da capacidade térmica dos envelopes construtivos estão: a diminuição da transmissão de calor por condução, radiação e convecção para dentro e para fora das edificações e a redução do uso de sistemas para a climatização artificial nos períodos de pico de temperatura do ar e de consumo de energia elétrica, visto que esses sistemas funcionam como sistemas de amortecimento da temperatura das superfícies evitando os efeitos de retroalimentação positivos do sistema climático urbano.

Os efeitos da radiação solar sobre as superfícies urbanas, também pode ser compensado pelo uso de sistemas onde o calor proveniente do sol é transformado em outras formas de energia. Os sistemas ou painéis fotovoltaicos, por exemplo, geram energia elétrica, e os sistemas ou painéis termo solares promovem o aquecimento da água. A eficiência do uso destes sistemas, para promover a atenuação das temperaturas das superfícies urbanas, está associada às suas características de instalação, que deve ser feita de modo a garantir um vão entre os painéis e os telhados (QI et al., 2019).

É importante ressaltar que as estratégias para promover a redução das temperaturas da superfície e do ar, no meio ambiente urbano, devem estar associadas às características climáticas e construtivas locais, sendo essenciais para a preservar a saúde e a qualidade de vida nas cidades nos períodos de calor excessivo, bem como promover a eficiência energética em edificações.

2.3.3 Zoneamento climático e eficiência energética em edificações

O zoneamento climático é uma estratégia consolidada a partir das características climáticas de cada local, é estabelecido a partir de regiões que apresentam padrões climáticos semelhantes. O sistema de classificação climática mais conhecido é o sistema de classificação Koppen, elaborado no início do século XX. Os sistemas de zoneamento climático têm várias aplicações e vem sendo cada vez mais utilizados como base para o desenvolvimento de programas voltados para melhorar a eficiência energética em edificações e cidades, o que vem ocorrendo com mais frequência nos últimos 15 anos. As variáveis, métodos e os parâmetros mais utilizados em programas de eficiência energética para fins de zoneamento climático são: temperatura, graus dia, altitude e umidade relativa do ar (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2017).

Os métodos para a elaboração dos zoneamentos climáticos são classificados de acordo com sua finalidade: podem ser baseados na performance, em prescrições construtivas ou guias para o design de edificações. Os métodos baseados na performance de edifícios, geralmente se referem ao edifício como um todo, levando em consideração o consumo total de energia, o custo ou conforto térmico e a qualidade do ar dentro de edificações. O prescritivo é o mais utilizado no mundo. Está voltado para promover inovações nos programas de eficiência energética. Os métodos prescritivos prescrevem valores máximos e mínimos para as características termo físicas dos materiais que influenciam o comportamento térmico e

energético dos envelopes construtivos. As variáveis mais utilizadas são: transmitância térmica (U), coeficiente de ganho de calor solar (SHGC), razão entre área de janela e parede (WWR) e coeficiente de performance dos sistemas de ar condicionado (COP). É o método mais utilizado no mundo. Os guias para o design passivo são geralmente aplicados na concepção dos projetos, no sentido de promover o aquecimento ou resfriamento das edificações, consideram os recursos naturais locais, abordam questões como forma, orientação e materiais dos envelopes construtivos mais adequados para o clima em que se inserem. Existe uma grande variabilidade dos métodos e indicadores utilizados para fins de zoneamento climático (Tabela 2.3), porém as variáveis mais utilizadas em programas de eficiência energética ao redor do mundo, utilizadas para fins de zoneamento climático são: temperatura, graus dia, altitude e umidade relativa do ar (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2017).

Tabela 2.3 - Variáveis, critérios e técnicas utilizadas para zoneamento climático

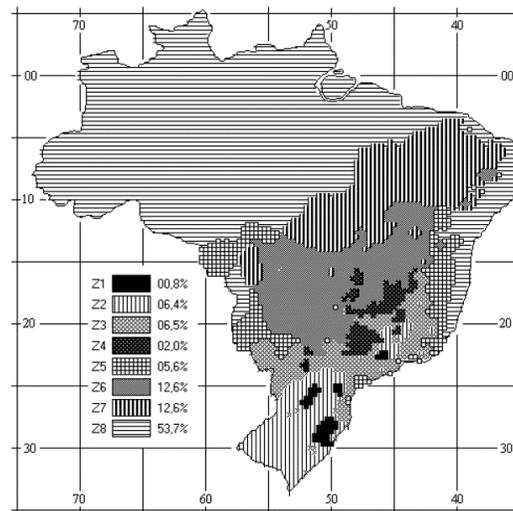
Classificação	Variável, critério ou técnica utilizados para zoneamento climático
Variável climática	temperatura
	umidade relativa
	radiação solar
	precipitação
	velocidade e direção do vento
Técnicas para acessar os dados de energia e processar os dados climáticos	carta bioclimática de Givoni
	tabelas de Mahoney
	análise de <i>clusters</i>
	Simulações
	graus-dia
Outros parâmetros	Altitude
	divisão administrativa
	dimensão do espaço urbano
	classificação Koeppen
	arquitetura vernacular
	índices de conforto
	inversão térmica
	Sazonalidade

Fonte: Walsh, Cóstola e Labaki (2017), traduzido.

2.3.4 Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBB)

O zoneamento climático do território brasileiro foi feito a partir das informações das normais climatológicas considerando: médias mensais da temperatura máxima do ar, médias mensais da temperatura mínima do ar e média mensal da umidade relativa do ar. O ZBB (Figura 2.12) propõe a divisão do território brasileiro em 8 zonas relativamente homogêneas quanto ao clima, e estabelece uma série de diretrizes técnicas e construtivas definidas para otimizar o desempenho térmico das habitações unifamiliares de interesse social no Brasil, em função de sua melhor adequação climática (ABNT, 2003).

Figura 2.12 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro



Fonte: ABNT (2003).

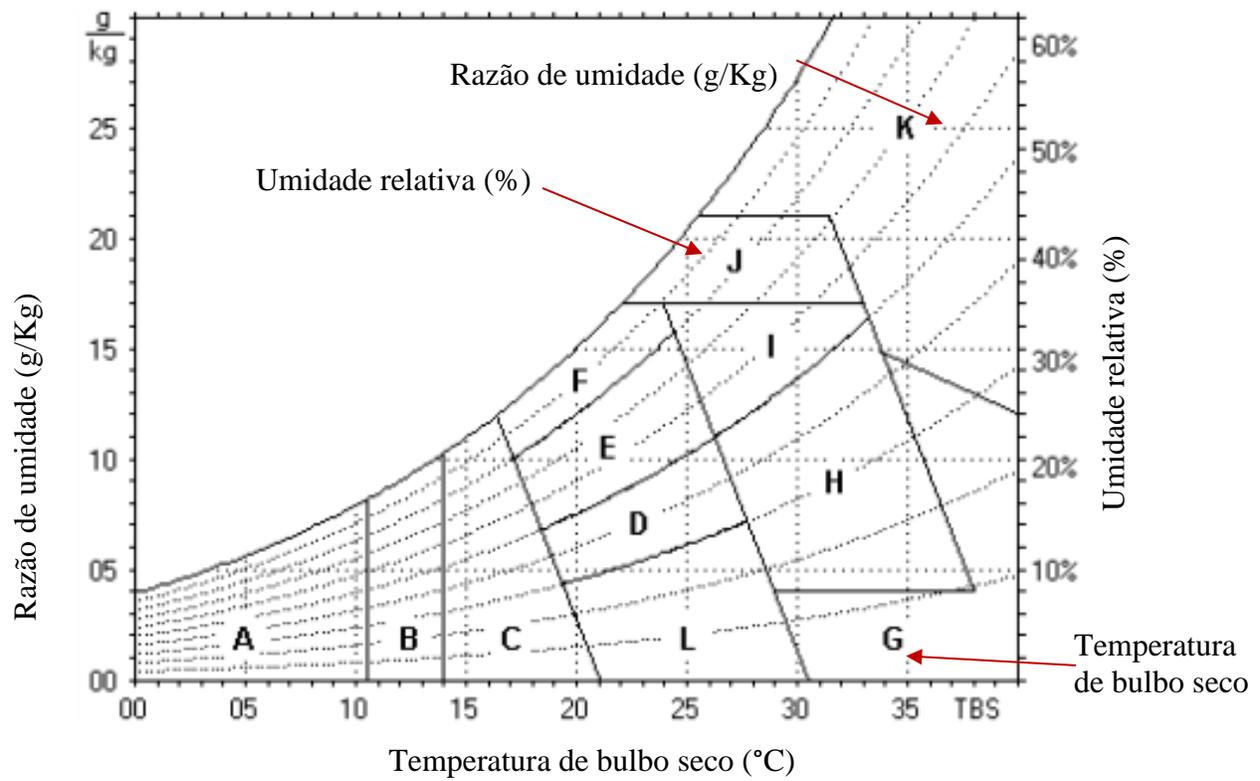
As estratégias construtivas (Figura 2.13), sugeridas para cada zona bioclimática no Brasil, foram definidas a partir da carta bioclimática adaptada para o Brasil (GIVONI, 1992). A carta bioclimática proposta por Givoni (Figura 2.14), e adaptada para o Brasil, delimita as estratégias construtivas que devem ser utilizadas a partir da caracterização das condições climáticas em cada local.

Figura 2.13 - Estratégias construtivas

A – Zona de aquecimento artificial (calefação)	G + H – Zona de resfriamento evaporativo
B – Zona de aquecimento solar da edificação	H + I – Zona de massa térmica de refrigeração
C – Zona de massa térmica para aquecimento	I + J – Zona de ventilação
D – Zona de Conforto Térmico (baixa umidade)	K – Zona de refrigeração artificial
E – Zona de Conforto Térmico	L – Zona de umidificação do ar
F – Zona de desumidificação (renovação do ar)	

Fonte: ABNT (2003).

Figura 2.14 - Carta bioclimática adaptada para o Brasil



Fonte: ABNT (2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, o método foi desenvolvido considerando a dependência espacial da temperatura das superfícies (TS). O método contempla: o uso de dados de satélite, para a estimativa e mapeamento das características espectrais e temperatura das superfícies; o uso de dados sócio econômicos; e a representação da área de estudos, por um modelo empírico espacialmente explícito, onde o território urbano é representado a partir de uma matriz computacional ou espaço celular (CS), com alta resolução espacial (60 x 60 metros). O espaço celular foi criado como o objetivo de integrar as informações multidisciplinares e viabilizar as análises estatísticas, utilizadas para identificar as relações espaciais entre TS, características espectrais das superfícies, calor antropogênico e padrões da paisagem associados às ZCLs, bem como produzir diagnósticos do clima urbano.

As variáveis ou características espectrais, utilizadas para explicar o desempenho térmico e energético das superfícies urbanas foram escolhidas considerando-se os fatores que influenciam o balanço de energia nas superfícies urbanas, descritos na equação 2.1:

- a) fração de cobertura de vegetação (FCV), utilizada para representar a vegetação e processos de resfriamento associados: sombreamento, evapotranspiração e permeabilidade do solo, que remetem as infraestruturas verdes;
- b) emissividade (ϵ) para representar os processos de emissão de radiação de onda longa, em função da temperatura;
- c) albedo (A) para representar a capacidade de uma superfície refletir radiação de onda curta ou radiação solar;
- d) índice de umidade por diferença normalizada (NDMI), utilizado para representar a presença de água na superfície e áreas permeáveis, que remete as infraestruturas azuis;
- e) temperatura das superfícies (TS), para representar o saldo de energia resultante da interação das variáveis espectrais no espaço;
- f) consumo anual de energia elétrica por habitante, por metro quadrado (Watts.ano/m²), para representar o calor antropogênico (Q_f) nos diferentes setores socio econômicos na área de estudos.

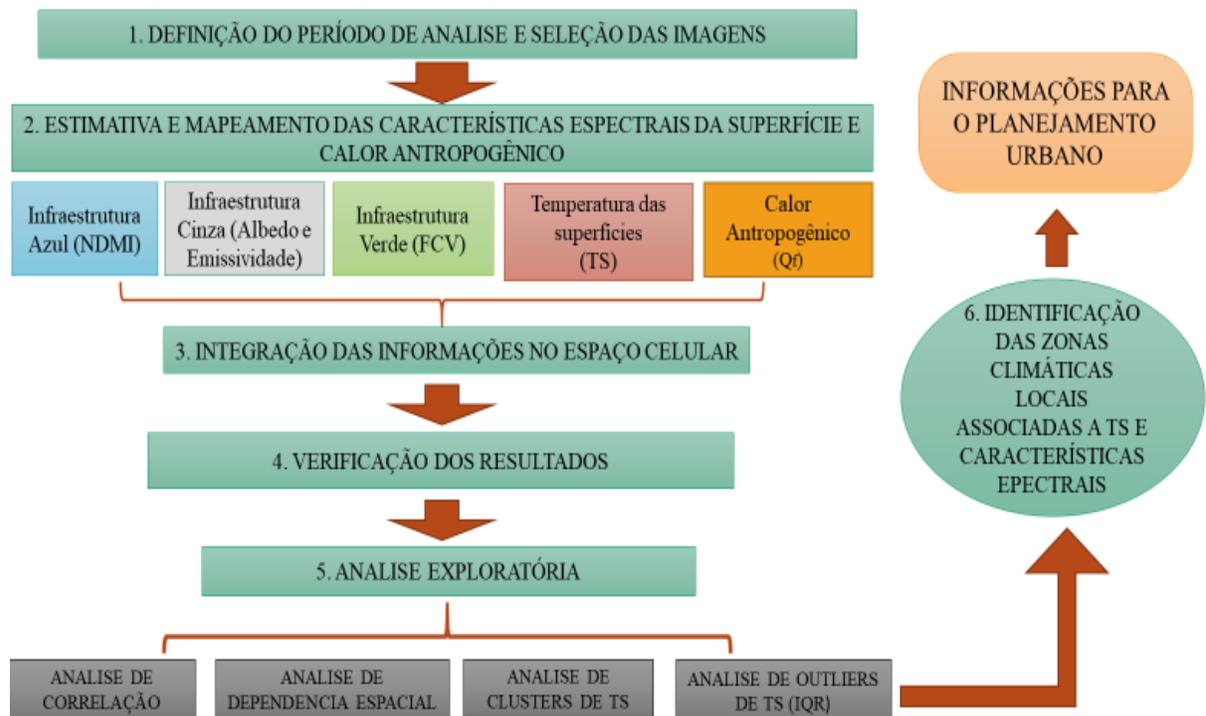
O sistema de classificação utilizado para representar os padrões da paisagem urbana foi baseado nas Zonas Climáticas Locais (STEWART; OKE, 2012; STEWART; OKE; KRAYENHOFF, 2014). O cálculo do calor antropogênico foi feito com base nos dados de densidade demográfica (habitante/m²) na área de estudos e consumo de energia elétrica por habitante por ano (Wattsm²). O método utilizado para atingir os objetivos propostos foi realizado em seis etapas:

(1) definir o período de análise, com base nos dados das estações meteorológicas locais, e selecionar as imagens do satélite *Landsat-8* com cobertura de nuvens abaixo de 10%;

- (2) estimar e mapear as características espectrais (fração de cobertura de vegetação, emissividade, albedo e NDMI) e temperatura da superfície por sensoriamento remoto, utilizando produtos da coleção *Landsat-8* Nível 2 (L8-L2);
- (3) integrar os resultados das estimativas por satélites e de calor antropogênico espaço celular criado para representar a área de estudos;
- (4) verificar os resultados obtidos por sensoriamento remoto, comparando-se os resultados obtidos nesta pesquisa como obtidos em pesquisas correlatas;
- (5) realizar análises exploratórias utilizando técnicas estatísticas: análise de correlação, análise de autocorrelação espacial, análise de *clusters* de temperatura de superfícies e análises dos outliers;
- (6) identificar padrões do tecido urbano, que produzem a retroalimentação negativa do sistema climático urbano naturalmente, utilizando o sistema de classificação das zonas climáticas locais (ZCLs).

O fluxograma da Figura 3.1 apresenta de forma resumida a sequência das etapas realizadas para atingir os objetivos propostos. O item 3.1, descreve a área de estudos, e os itens 3.3, 3.4 e 3.5 descrevem as métricas utilizadas para alcançar os objetivos propostos.

Figura 3.1 - Fluxograma: etapas para consolidação do método e objetivos.



Fonte: Produção do autor.

As bases de dados utilizadas foram: o banco de imagens do Serviço Geológico Americano (USGS) (USGS, 2019a), onde foram obtidas as imagens do satélite *Landsat-8* da coleção Nível 2 (L8-L2); o banco de dados da Empresa Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (CETESB, [s.d.]) e o banco de dados climatológicos do comando da aeronáutica (REDEMET, [s.d.]) de onde foram tiradas as informações sobre as condições meteorológicas na área de estudos; o acervo de mapas, imagens e leis da Prefeitura Municipal de São José dos Campos (PMSJC, [s.d.], 2018); o banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, [s.d.], 2017); o acervo de imagens do Google Earth (“Google Earth”, [s.d.]). Os *softwares* utilizados foram: QGIS, sistema de informação geográfica (SIG) (EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO DO QGIS., 2017), o “*Fillcell*” gerenciador de *scripts* utilizado para a construção do espaço celular (CS) e preenchimento de células compatível com os programas desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)(INPE, [s.d.]), o (3) GeoDa (GEODA, 2019a) e o R Studio (RSTUDIO, 2015). Todos *softwares* gratuitos de código aberto.

3.1 Área de estudos

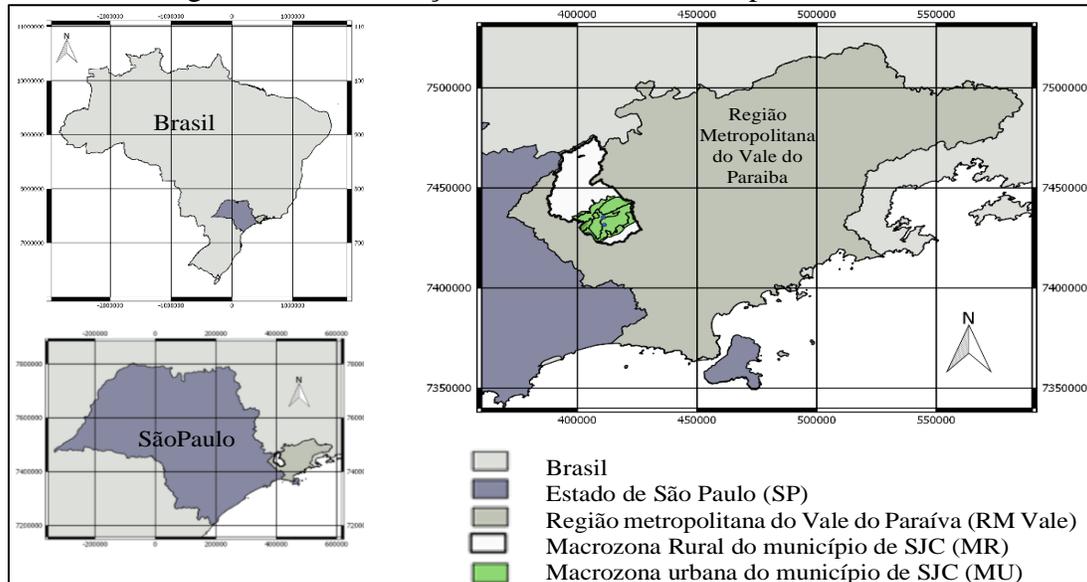
A área de estudos compreende a macrozona urbana do município de São José dos Campos (23°10'46”S; 45°53'13”W), São Paulo, Brasil (Figura 3.2).O município é um importante polo industrial e tecnológico da região Sudeste, com população estimada 713.943 habitantes, dos quais aproximadamente 97% residem em área urbana (IBGE, 2017). O município integra a Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVale), criada através da Lei Complementar estadual nº 1166, de 9 de Janeiro de 2012. A RMVale compõe-se de 39 municípios e é subdividida em 5 sub-regiões. São José dos Campos é o município sede da sub-região 1, que agrega os municípios de Jacareí, Igaratá, Santa Branca, Jambuí, Monteiro Lobato, Paraíba e Caçapava (Figura 3.3) (EMPLASA, 2013).

De acordo com o Plano diretor de desenvolvimento integrado de São José dos Campos, apresentado pela Lei Municipal nº 612, de 20 de Novembro de 2018 (PMSJC, 2018), o município é dividido em macrozona rural e macrozona urbana. A macrozona rural, ocupa 67,8% da área total do município, é destinada aos usos não urbanos, áreas de mananciais e cabeceiras de sistemas de drenagem, com enfoque para o desenvolvimento de atividades agropecuárias, de proteção ambiental e turísticas. A macrozona urbana ocupa cerca de 32,2% do território. É destinada aos usos predominantemente urbanos sendo dividida em três macrozonas destinadas ao uso urbano: macrozona de consolidação (MC), macrozona de estruturação (ME) e macrozona de ocupação controlada (MOC) e duas áreas de proteção ambiental (APAs) (Figura 3.4).

A macrozona de consolidação (MC) é o perímetro caracterizado pela continuidade da malha urbana, com plena acessibilidade, elevada oferta de empregos, equipamentos e serviços públicos. A macrozona de estruturação (ME) é o perímetro caracterizado pela descontinuidade da malha urbana onde deve-se priorizar a implantação de novos loteamentos e a diversidade de usos da terra, pois possui menor oferta de comércios, equipamentos e serviços. A macrozona de ocupação controlada (MOC), caracteriza-se por áreas urbanas

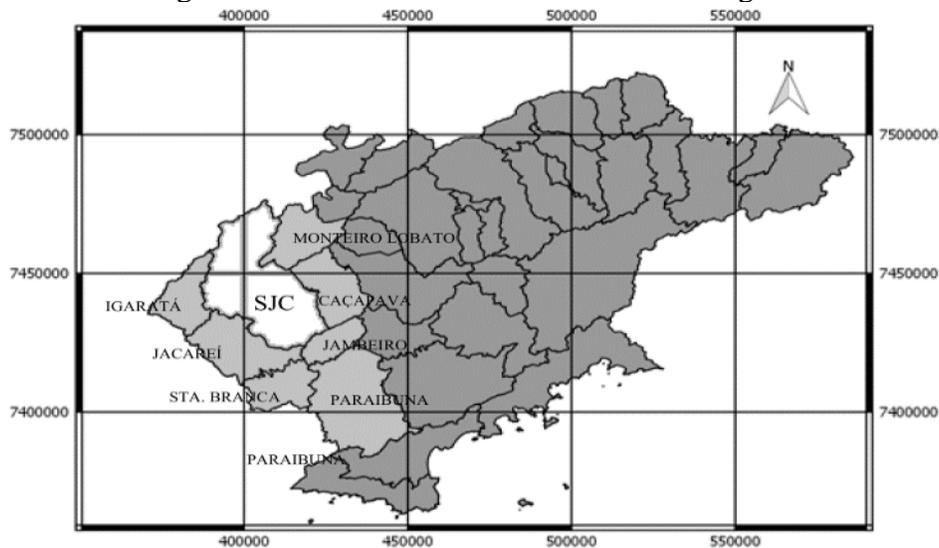
periféricas com acessibilidade e infraestrutura precárias, carência de equipamentos e serviços urbanos, devendo sua ocupação ser controlada no sentido de evitar o espraiamento da área urbana. As áreas de proteção ambiental (APAs), perímetro constituído pelas planícies aluvionares do Rio Paraíba do Sul e do Rio Jaguari, cujas características geomorfológicas e condições hídricas dos terrenos demandam normas específicas de uso e ocupação a serem estabelecidas por meio da implementação de plano de manejo (PMSJC, 2018).

Figura 3.2 - Localização de São José dos Campos, SP. Brasil.



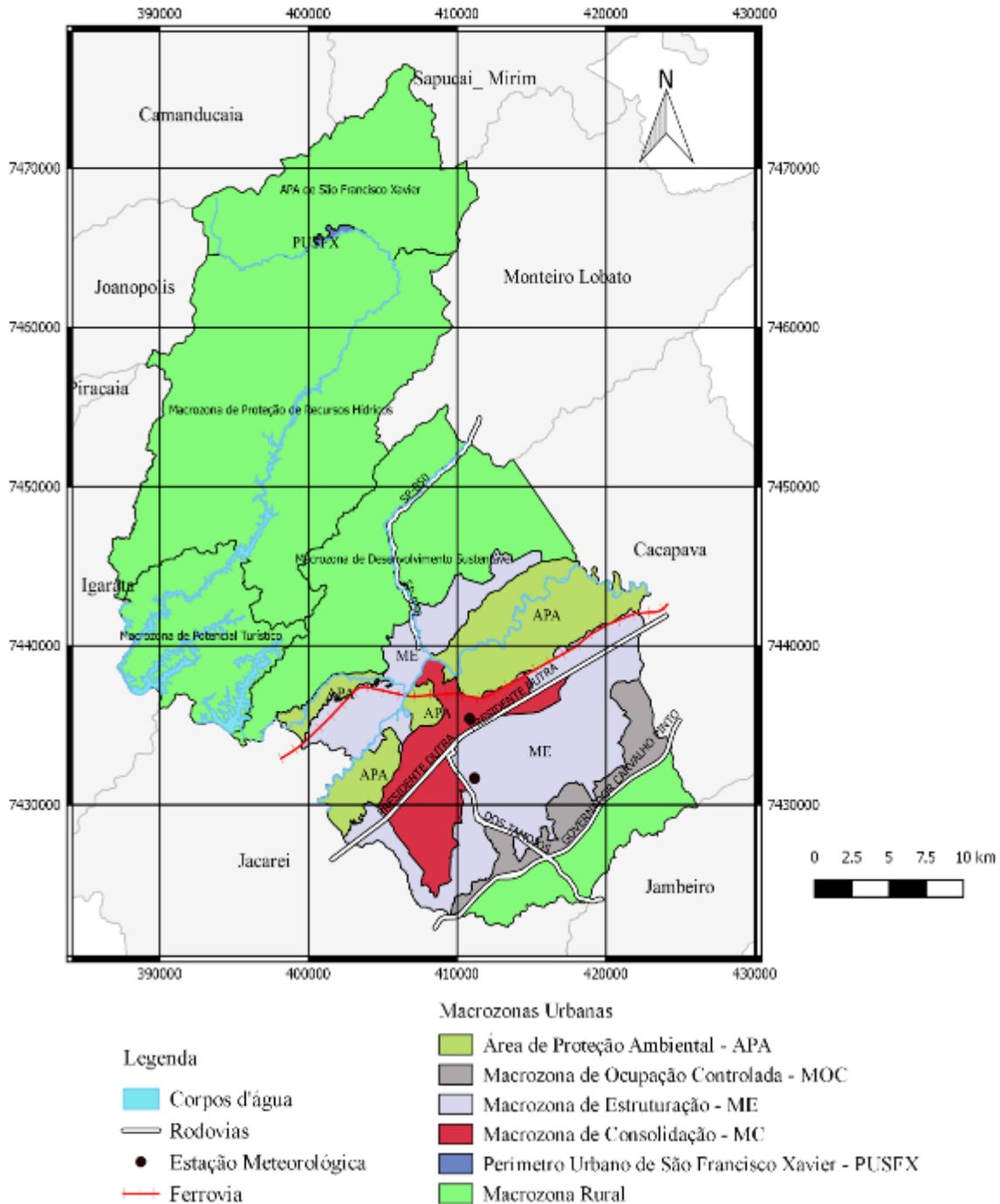
Fonte: Adaptado de EMPLASA (2013) e IBGE (2017).

Figura 3.3 - RMVale: Detalhamento da sub-região 1



Fonte: Adaptado de EMPLASA (2013).

Figura 3.4 - Macrozonas de São José dos Campos



Fonte: Adaptado de PMSJC (2018).

Nesta pesquisa, a macrozona de consolidação (MC) foi escolhida como foco das análises e experimentos, pois é o perímetro onde as atividades urbanas estão plenamente consolidadas,

cujo comportamento térmico de sua superfície é fruto das políticas urbanas praticadas no município nos últimos anos, podendo servir de modelo para compreensão do comportamento térmico do tecido urbano consolidado e produção de *benchmarking*. O *benchmarking* é uma ferramenta de gestão, utilizada para melhorar o desempenho de sistemas, que é feita com base na equiparação de práticas, produtos ou serviços, com o objetivo de identificar e superar aqueles que apresentam a melhor eficiência.

Nos municípios, os domicílios, em sua maioria (94,3%), possuem esgotamento sanitário adequado, são servidos pela rede elétrica (99%), estão localizados em vias públicas com arborização (94,7%), sendo que somente 66,4% das vias públicas possuem sistemas de captação de águas pluviais, calçadas e pavimentação (IBGE, 2017). Na cidade de São José dos Campos os materiais comumente utilizados nas coberturas dos edifícios são: telhas cerâmicas, fibrocimento, e cimento colorido cinza, já os pavimentos resumem-se a coberturas asfálticas nas vias, pisos cimentícios e pedras. Observa-se o crescente aumento de coberturas metálicas de alta refletância nos grandes empreendimentos comerciais.

A densidade demográfica média na macrozona urbana de SJC é 1947,3 habitantes por quilometro quadrado (habitante/km²), sendo que nos setores sócio econômicos mais habitados pode chegar a 8392 habitante/km² e nas menos habitadas 14,50 habitante/km² (PMSJC, 2019) A densidade a domiciliar média é aproximadamente 3,2 habitantes por domicílio, sendo que aproximadamente 82% dos domicílios caracterizam-se por casas e 18% por apartamentos (PMSJC, 2016). O consumo médio de energia elétrica por habitante é de 342,5 Watts.ano ou 3004,2 kWh/habitante.ano (SÃO PAULO, 2020).

Tabela 3.1- Densidade demográfica e domiciliar na macrozona urbana do município de São José dos Campos, SP, Brasil.

Setor Sócio Economico	Densidade Demográfica (hab/km ²)	Densidade Domiciliar (habitante/domicílio)
APA Jaguari	27,5	3,8
Parque Industrial	4029,1	3,2
Jardim das Industrias	3411,1	3,2
APA Limoeiro	41,7	3,4
Urbanova	408,4	3,3
Jardim Esplanada	2070,4	2,9
Alto da Ponte	3873,5	3,5
Santana	3369,6	3,1
APA Banhado/Santana	256,3	3,3
Centro	5784,3	3,0
APA Banhado	311,1	3,5
Vila Industrial	4978,1	3,2
APA Martins Guimarães	30,3	4,3
Eugênio de Melo	2172,3	3,5

Continua

Tabela 3.1 - Conclusão

APA Eugênio de Melo	16,0	3,6
Pararangaba - Campos de São José	1723,0	3,5
Vista Verde	2243,5	3,3
Vargem Grande	190,7	3,6
Novo Horizonte	2540,9	3,6
Capão Grosso	636,8	3,6
APA	14,5	0,0
Jardim Paulista	6735,0	3,3
Jardim da Granja	3190,8	3,5
CTA	210,1	3,6
Torrão de Ouro	489,7	3,7
Campo dos Alemães	6393,1	3,8
Bosque dos Eucaliptos	8392,0	3,3
Jardim Satélite	7372,6	3,0
Jardim Oriente - Morumbi	8122,7	3,3
Jardim Aquarius	3668,6	2,9
Vila Adyanna	7886,2	2,5
Vila São Bento	1613,8	3,5
Putim	1301,3	3,7
Serrote	306,2	3,4
Buquirinha	1824,1	3,3
São Francisco Xavier	1309,0	3,1
Média	1947,3	3,2

Fonte: PMSJC (2019).

3.1.1 Classificação climática da área de estudos

O clima em São José dos Campos (SJC), de acordo com a classificação Köppen, é o subtropical úmido (Cfa), com chuvas no verão e seca no inverno, (VIANELLO; ALVES, 2013). A Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7, cujos dados foram gerados a partir da estação meteorológica de superfície, localizada no aeroporto de SJC, apresentam os gráficos de temperatura do ar (Tar em °C), umidade relativa do ar (UR em %) e precipitação de chuvas (mm), obtidos para a área de estudo (SJC), entre janeiro de 1974 e dezembro de 2018. Este intervalo de tempo corresponde ao acervo de dados históricos disponível na base de dados do ICEA (REDEMET, 2018). Neste período a média anual de temperatura do ar (Tar) no município foi 20,95 °C (desvio padrão 2,59°C), a média da umidade relativa do ar foi 74,50% (desvio padrão 11,72%) e a média anual de chuvas 1078,32 mm.

Figura 3.5 - Média anual de temperatura do ar (Tar em °C) em SJC.

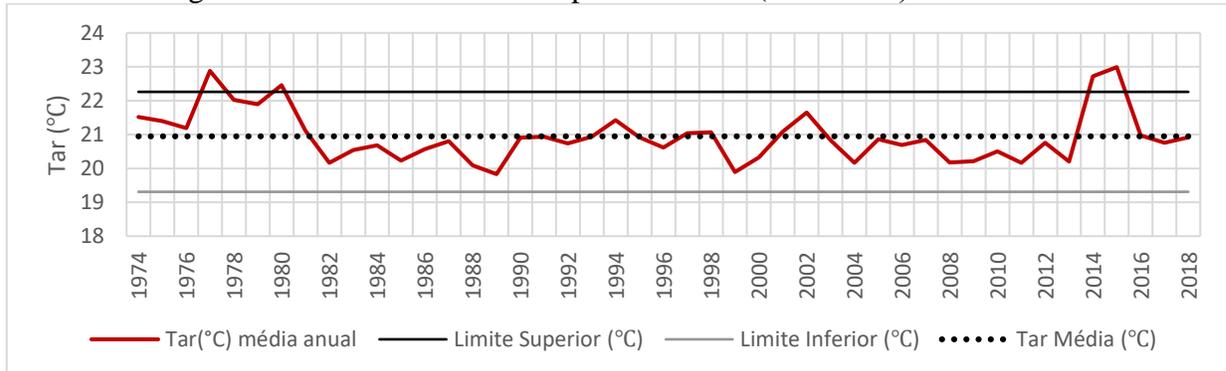


Figura 3.6 - Média anual de umidade relativa do Ar (%) em SJC

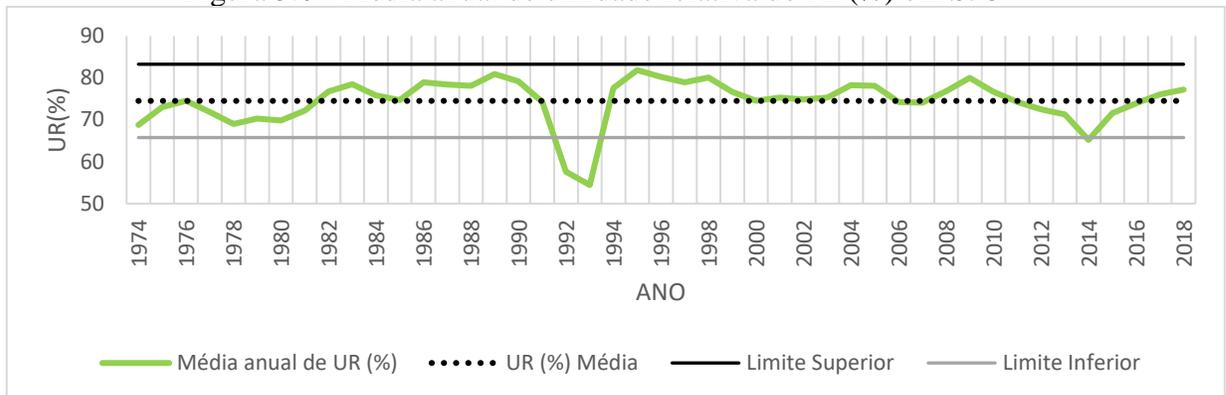
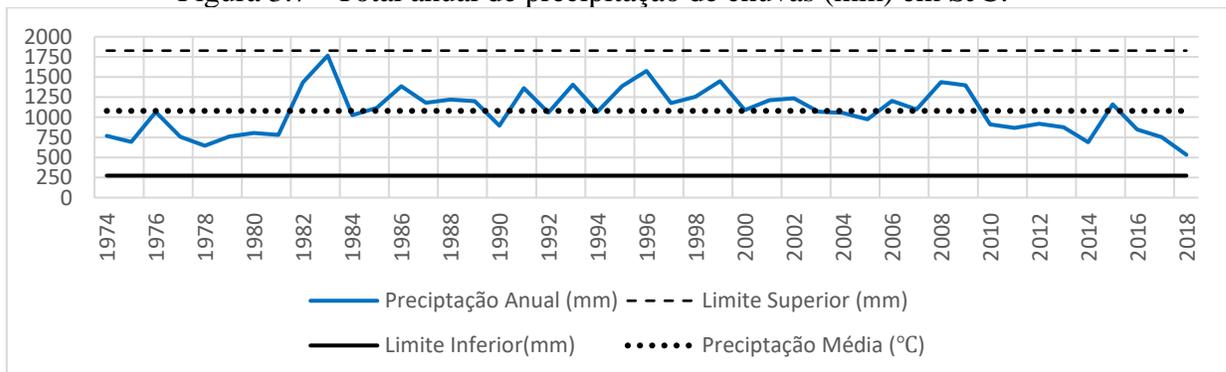


Figura 3.7 - Total anual de precipitação de chuvas (mm) em SJC.



Fonte: Adaptado de: REDEMET (2018).

A avaliação dos dados obtidos na estação meteorológica do aeroporto de SJC foi feita a partir do cálculo da amplitude ou intervalo interquartil (IQR), com o objetivo de identificar a ocorrência de eventos extremos. O IQR é uma medida de dispersão estatística, calculada a partir da mediana de um conjunto de dados. O mesmo permite calcular limites máximos e

mínimos para um conjunto de dados e identificar quanto longe um resultado do conjunto de dados está distante da média para ser considerado um resultado extremo ou “outlier” (UPTON; COOK, 1996). Os outliers são resultados extremos, considerados suspeitos ou raros, pois estão longe dos resultados esperados para uma determinada variável ou população podendo influenciar os valores médios calculados para um conjunto de dados (OSBORNE; OVERBAY, 2004).

O cálculo da amplitude interquartil (IQR), utilizado para identificar os outliers é feito a partir da diferença entre os valores da mediana superior, denominada quartil 3 (Q3) e mediana inferior ou quartil 1 (Q1) (Equação 3.1).

$$\text{IQR} = \text{Q3} - \text{Q1} \quad (3.1)$$

IQR: intervalo interquartil

Q3: mediana superior ou quartil 3

Q1: mediana inferior ou quartil 1

A identificação dos outliers ou resultados extremos foi feita a partir da definição dos limites superiores (Lsup) e inferiores (Linf) para o conjunto de dados. Os valores acima e abaixo destes limites são considerados valores extremos ou outliers (Equação 3.2 e Equação 3.3).

$$\text{Lsup} = \bar{x} + (1,5 * \text{IQR}) \quad (3.2)$$

$$\text{Linf} = \bar{x} - (1,5 * \text{IQR}) \quad (3.3)$$

Lsup: limite superior

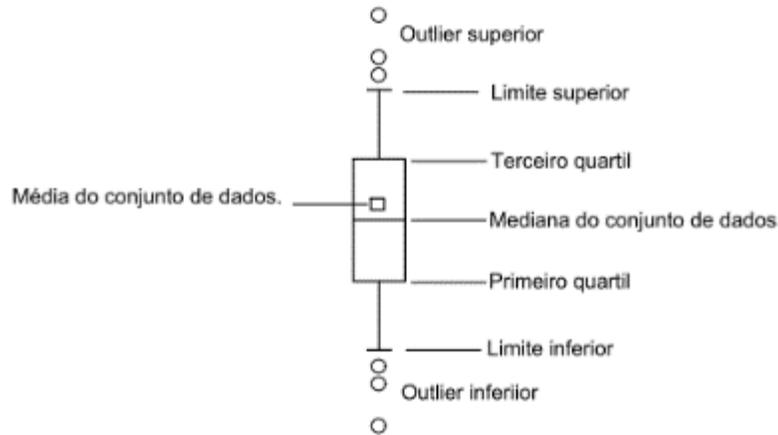
Linf: limite inferior

\bar{x} : média para o conjunto de dados

IQR: intervalo interquartil

O elemento gráfico utilizado para representar um conjunto de dados com base no IQR é o gráfico de caixa ou *boxplot*. Os gráficos de caixa ou “*boxplots*” contêm seis informações elementares de conjuntos de dados: mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e valores máximos e o valor médio (Figura 3.8) (UPTON; COOK, 1996).

Figura 3.8 - Gráfico de caixa ou *boxplot*

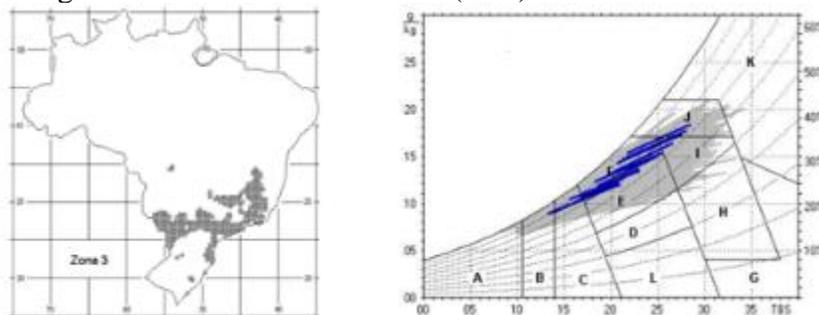


Fonte: Adaptado de Upton e Cook (1996).

Os anos mais frios foram 1989 e 1999, com Tar média de 19,83°C e 19,90 °C e umidade relativa do ar (UR) de 80,92% e 76,64% respectivamente, e os anos mais quentes foram 2015 e 2014 com Tar média de 22,99°C e 22,72°C e UR 74,50% e 65,23% respectivamente. Os anos com as menores médias de precipitações de chuvas foram 2018 (532,60mm) e 1988 (646,50mm) e os anos com as maiores precipitações de chuvas médias 1996 (1573,70mm) e 1983 (1765,20mm).

O município está localizado na zona bioclimática 3 (ZB3), de acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro (ABNT, 2003) (Figura 3.9). As diretrizes construtivas recomendadas na ZB3, como estratégias para condicionamento térmico passivo em edificações residenciais, são a ventilação cruzada para o verão e o aquecimento solar passivo para o inverno, permitindo-se a entrada de radiação solar pelas aberturas nesta época do ano.

Figura 3.9 - Zona bioclimática 3 (ZB3) e carta bioclimática.



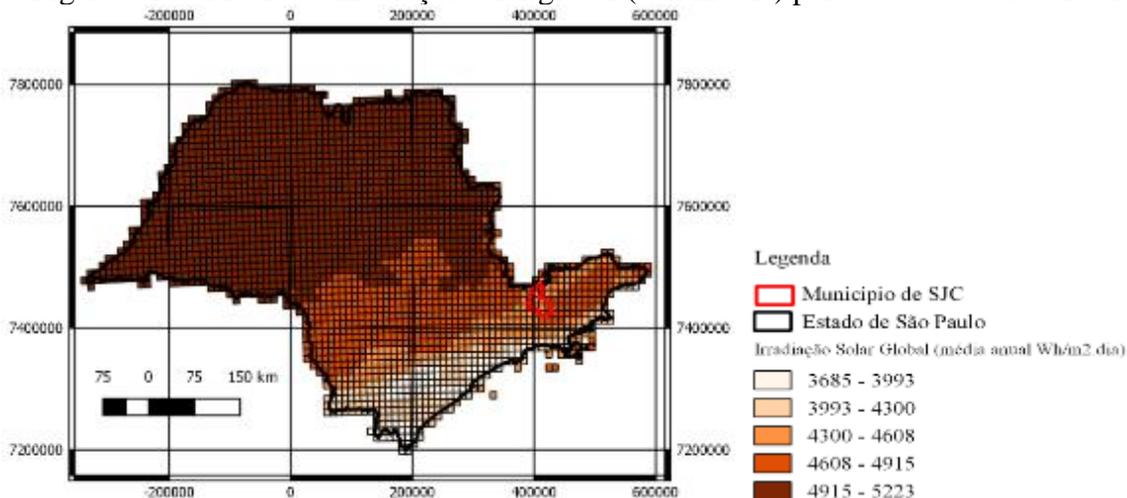
Fonte: ABNT (2003).

As prescrições construtivas para a ZB3, descritas na NBR 15220-Parte 3, sugerem que sejam utilizadas aberturas ou janelas com dimensões classificadas como médias, ou seja com dimensão ou área entre 15 e 25% da área de piso do ambiente, sendo passíveis de fechamento

durante os períodos frios; vedações internas pesadas com alta inércia térmica e paredes externas leves e refletoras (ABNT, 2003).

Os níveis de irradiação solar na região Sudeste brasileira, onde localiza-se a área de estudos, são mais altos e apresentam menor variabilidade quando comparados com países europeus como Portugal, Alemanha, Espanha, Itália e França. A média diária de irradiação solar global horizontal diária na região Sudeste é de 5,06 kWh/m².dia e no plano inclinado 5,26 kWh/m².dia (PEREIRA et al., 2017). O mapa da Figura 3.10 apresenta a distribuição da média anual de irradiação solar global horizontal (Wh/m².dia) no estado de São Paulo.

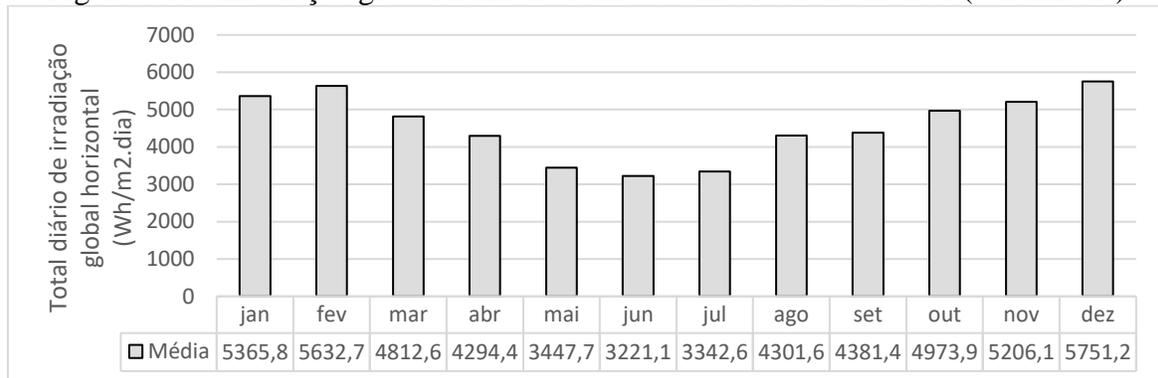
Figura 3.10 - Média de irradiação solar global (Wh/m².dia) para o estado de São Paulo.



Fonte: Adaptado de: Pereira et al. (2017).

No município de SJC a irradiação solar global horizontal diária, para cada mês, varia entre 5751,2 Wh/m².dia, em dezembro e 3221,1 Wh/m².dia em junho, com irradiação solar global horizontal média de 4560 Wh/m².dia ou 190 Watts/m². A Figura 3.11 apresenta o gráfico com os valores de irradiação solar global horizontal diários, para cada mês, na área macrozona urbana de SJC. Considerando que a média de consumo de energia elétrica, por unidade de consumo residencial, na região Sudeste brasileira em 2019 foi de 173,71 kWh/mês (EPE, 2020), com uma demanda diária média, de aproximadamente 5,8kWh/dia, é possível concluir que a região possui uma ampla oportunidade de utilização da radiação solar para a geração solar fotovoltaica distribuída e utilização de energia termo solar para aquecimento de água.

Figura 3.11 - Irradiação global horizontal em SJC: média diária mensal (Wh/m2.dia)

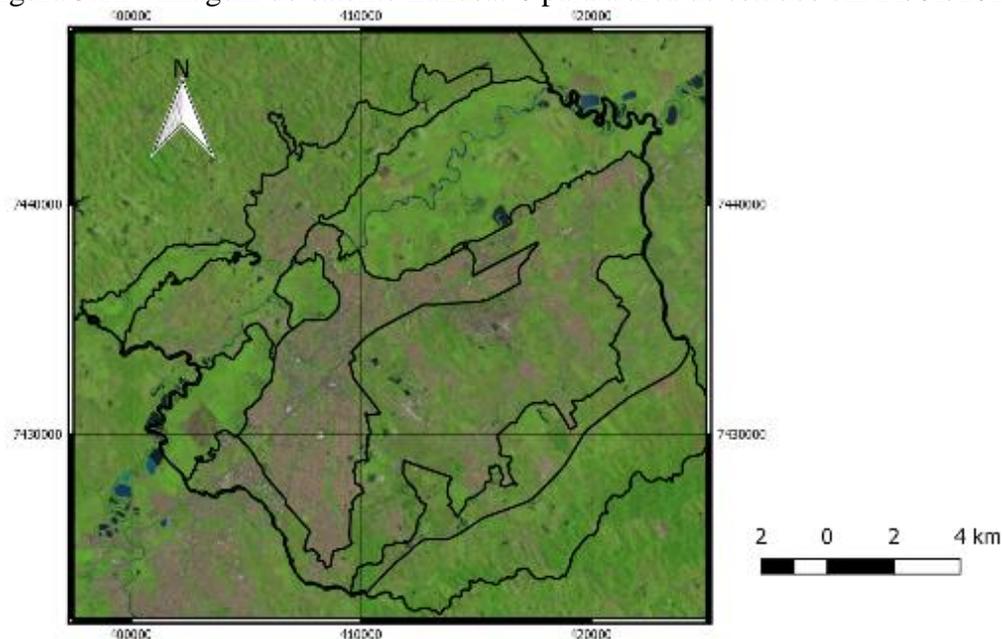


Fonte: Adaptado de: Pereira et al. (2017).

3.2 Definição do período de análise e seleção das imagens

O período de análise foi definido entre 2014 e 2015, anos que apresentaram as maiores médias anuais de temperatura do ar (T_{ar}) nos últimos 30 anos. As estimativas foram realizadas utilizando-se imagens do satélite *Landsat 8*, para a órbita 219, ponto 76, com incidência de nuvens abaixo de 10%, adquiridas às 13:00 UTC ou 10:00 horas em horário local. Os produtos utilizados são provenientes da coleção do *Landsat 8* nível-2 (L8-L2), derivada da coleção *Landsat 8* nível-1. A imagem da Figura 3.12 apresenta uma imagem da coleção nível 1 do satélite *Landsat 8*.

Figura 3.12 - Imagem do satélite Landsat-8 para a área de estudos em 21/01/2019.



Fonte: Adaptado de USGS (2019a).

Os produtos da coleção L8-L2 já contemplam as correções atmosféricas relativas aos fatores geofísicos, que influenciam os dados coletados pelos sensores a bordo dos satélites, como os gases presentes na atmosfera, aerossóis e altitude. As coleção de imagens Landsat Level-2 foi produzida para atender a demanda mundial de dados para a elaboração de estudos sobre as mudanças climáticas globais (JONESCHEIT; LINDA, 2015)

A Tabela 3.2 contém as informações sobre as 9 imagens utilizadas nesta pesquisa, bem como: a data de aquisição das imagens, os dados de temperatura do ar obtidos nas estações meteorológicas da CETESB e do Aeroporto de SJG e o número de graus hora de resfriamento (GHR) e graus hora de aquecimento (GHR) na hora da aquisição de cada imagem (13:00 UTC ou 10 horas local). Uma imagem de 2019, foi selecionada para fins de comparação com os resultados obtidos no período crítico (2014 e 2015), onde observaram-se as Tar mais elevadas dos últimos 30 anos. Os resultados da Tabela 3.2 apontam que em fevereiro de 2014 e janeiro de 2015 foram os dias mais quentes, o que pode ser concluído dado o número de graus hora de aquecimento obtidos na hora em que as imagens foram adquiridas.

Tabela 3.2 - Lista de imagens do satélite Landsat8 e dados climáticos na hora de sua aquisição (13:00hs UTC ou 10:00hs Local)

DATA DE AQUISIÇÃO	DADOS DE IDENTIFICAÇÃO DA IMAGEM (ÓRBITA 219/LINHA76)	Est.Met. CETESB	Est. Met. Aeroporto
		Média horária da Tar (°C)	Média horária da Tar (°C)
08/02/2014	LC08_L1TP_219076_20140208_20170426_01_T1	28,9	32
28/03/2014	LC08_L1TP_219076_20140328_20170424_01_T1	24,3	24
15/05/2014	LC08_L1TP_219076_20140515_20170422_01_T1	20,1	21
02/07/2014	LC08_L1TP_219076_20140702_20170421_01_T1	18,1	19
03/08/2014	LC08_L1TP_219076_20140803_20170420_01_T1	21,2	24
06/10/2014	LC08_L1TP_219076_20141006_20170418_01_T1	18,5	21
25/12/2014	LC08_L1TP_219076_20141225_20170420_01_T1	24,8	29
10/01/2015	LC08_L1TP_219076_20150110_20170415_01_T1	27,6	32
21/01/2019	LC08_L1TP_219076_20190121_20190201_01_T1	24,7	28
Todos	Média	23,1	25,6
Todos	Desvio Padrão	3,9	4,9
Todos	Mediana	24,3	24,0

Fonte: Produção do autor.

Os satélites da série *Landsat* são desenvolvidos pela Agência Espacial Americana (NASA) e realizam o levantamento de imagens multiespectrais no globo terrestre desde a década de 1970, consistindo na mais longa série de dados de satélite disponível para análises espaciais. As imagens têm resolução espacial de 120 e 30 metros e resolução temporal de 16 dias (USGS, [s.d.]). As imagens do satélite *Landsat* 8 são obtidas por dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O OLI adquire informações em 9 bandas espectrais (1 a 9) e o TIRS em nas duas bandas (10 e 11) que representam a radiação infravermelha (Tabela 3.3) (USGS, 2019b).

Tabela 3.3 - Bandas e resoluções dos sensores do satélite Landsat 8

Sensores Landsat 8	Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução (m)
Operational Land Imager (OLI)	Band 1 - Ultra Azul (costal/aerossol)	0,435 – 0,451	30
	Band 2 – Azul	0,452 – 0,512	30
	Band 3 – Verde	0,533 - 0,590	30
	Band 4 – Vermelho	0,636- 0,673	30
	Band 5 – Infravermelho próximo (NIR)	0,851 - 0,879	30
	Band 6 – Infravermelho de onda curta (SWIR) 1	1,566 - 1,651	30
	Band 7 – Infravermelho de onda curta (SWIR) 2	2,101 - 2,294	30
	Band 8 – Pancromática	0,50 - 0,68	15
	Band 9 – Cirrus	1,363 - 1,384	30
Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Band 10 – Infravermelho Termal (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100 * (30)
	Band 11 – Infravermelho Termal (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100 * (30)

* As bandas adquiridas pelo TIRS têm resolução de 100 metros, mas os produtos foram remodelados para pixels de 30 metros.

Fonte: USGS (2014).

Para a qualificação dos produtos da coleção *Landsat* Level-2, são utilizados algoritmos distintos para diferentes satélites da série *Landsat*. As imagens do satélite *Landsat* 8, são geradas a partir do *Surface Reflectance Code* (LaSRC) (VERMOTE et al., 2016), o software utiliza rotinas de correção atmosféricas adaptadas do código do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) para obter valores de refletância da superfície.

A estimativa e o mapeamento dos dados espectrais da superfície na área de estudo iniciou-se com o ajuste do fator de escala dos dados e a adequação da projeção cartográfica das imagens (VERMOTE et al., 2016).

O ajuste de escala foi realizado com o objetivo de padronizar a escala espacial e unidades de medida dos dados. Neste procedimento os produtos de interesse: temperatura de brilho (TB ou BT), NDVI, NDMI, e as bandas de refletância no topo da atmosfera (TOA), foram utilizadas, sendo os valores de cada pixel multiplicados pelos fatores de escala disponíveis nos guias para utilização dos produtos de refletância da superfície do *Landsat* (Tabela 3.4).

O ajuste das projeções das imagens foi para adequar os produtos da coleção *Landsat* Level-2, cuja projeção original é baseada no Sistema Geodésico Mundial (WGS 84), ao Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS2000) adotado pelo Brasil em 25 de Fevereiro 2015 (IBGE, 2017).

Tabela 3.4 - Fatores de Escala para Produtos da série Landsat Level-2.

Produto	Satélite	Fator de escala	Unidade	Resolução (metros)
Temperatura de brilho (TB ou BT)	<i>Landsat 4-7-8</i>	0,1	K	30
Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	<i>Landsat 4-7-8</i>	0,0001	na	30
Índice de umidade por diferença normalizada(NDMI)	<i>Landsat 4-7-8</i>	0,0001	na	30
Refletância no topo da atmosfera (TOA)	<i>Landsat 4-7-8</i>	0,0001	na	30

Fonte: Vermote et al. (2016).

3.3 Estimativa e mapeamento das características espectrais e temperatura das superfícies

3.3.1 Fração de cobertura de vegetação (FCV)

Nesta pesquisa, a FCV foi estimada a partir das imagens de NDVI (CARLSON; RIPLEY, 1997). Para o cálculo de NDVI utilizando-se as imagens do satélite *Landsat 8* são utilizadas as bandas 5 (ρ_{nir}) e banda 4 (ρ_{red}) (VERMOTE et al., 2016).

Neste método os parâmetros utilizados para o cálculo da FCV (Equação 3.4) são estabelecidos a partir dos valores de NDVI para pixels com predominância de solo exposto, denominados NDVI do solo (NDVI_S) ou NDVI mínimo, e pixels com predominância de vegetação, denominados NDVI da vegetação (NDVI_V) ou NDVI máximo. Neste processo de aferição os valores negativos de NDVI são desconsiderados, visto que indicam áreas com água.

$$FCV = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2 \quad (3.4)$$

FCV _Fração de Cobertura de Vegetação;

NDVI_ índice da diferença normalizada de vegetação;

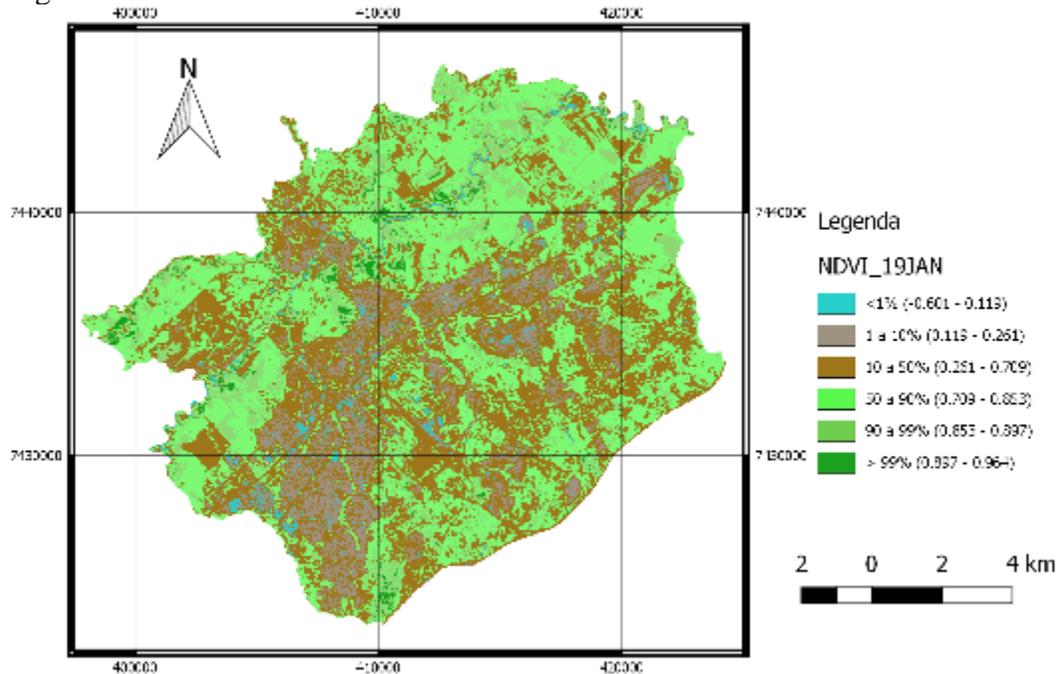
NDVI_S_ índice da diferença normalizada do solo exposto;

NDVI_V_ índice da diferença normalizada de solo com cobertura vegetal.

Nesta pesquisa, os valores de NDVI_S ou NDVI_{min} e NDVI_V ou NDVI_{max} foram definidos a partir do mapa de percentual de NDVI para cada data analisada. Este procedimento permitiu identificar o menor e o maior valor positivo de NDVI em cada cena, para a estimativa da

FCV. A Figura 3.13, gerada a partir do software GeoDa, consiste no mapa de percentual gerado a partir da imagem de NDVI da coleção Level-2 do satélite *Landsat 8*, em janeiro de 2019. O valor de $NDVI_s$ adotado para o cálculo do FCV foi de 0.119 e o valor de $NDVI_v$ foi 0.964, ambos os valores extraídos da legenda que resume as informações mapeadas.

Figura 3.13 - Percentual de NDVI em Macrozona Urbana de SJC em 21/01/2019.



Fonte: Produção do autor.

Os valores de $NDVI_s$ ou $NDVI_{min}$ e $NDVI_v$ ou $NDVI_{max}$, obtidos para cada imagem utilizada seguem descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Limites de NDVI utilizados para calcular a FCV

Código de identificação da imagem (órbita 219/linha 76)	Data de aquisição	$NDVI_s$ ou $NDVI_{min}$	$NDVI_v$ ou $NDVI_{max}$	DIF. NDVI
LC08_L1TP_219076_20140208_20170426_01_T1	08/02/2014	0,107	0,995	0,888
LC08_L1TP_219076_20140328_20170424_01_T1	28/03/2014	0,104	0,936	0,832
LC08_L1TP_219076_20140515_20170422_01_T1	15/05/2014	0,121	0,925	0,804
LC08_L1TP_219076_20140702_20170421_01_T1	02/07/2014	0,093	0,929	0,836
LC08_L1TP_219076_20140803_20170420_01_T1	03/08/2014	0,083	0,938	0,855
LC08_L1TP_219076_20141006_20170418_01_T1	06/10/2014	0,088	0,964	0,876
LC08_L1TP_219076_20141225_20170420_01_T1	25/12/2014	0,096	0,999	0,903
LC08_L1TP_219076_20150110_20170415_01_T1	10/01/2015	0,112	0,935	0,823
LC08_L1TP_219076_20190121_20190201_01_T1	21/01/2019	0,119	0,964	0,845

Fonte: Produção da autor.

3.3.2 Emissividade da superfície (ϵ)

A emissividade (ϵ) é elemento fundamental para o cálculo da temperatura da superfície terrestre. As técnicas e métodos utilizados para a estimativa da emissividade tem o objetivo de separar temperatura e emissividade no sentido de identificar o efeito da emissividade na temperatura e devem considerar as características termo físicas dos componentes das superfícies (WENG; LU; SCHUBRING, 2004).

Os métodos para apuração da emissividade a partir de imagens de satélites podem ser classificados como: (1) métodos semiempíricos ou teóricos, que se baseiam nas bandas espectrais do visível e infravermelho próximo (NIR) e consistem em estimar a emissividade a partir da classificação da superfície (CBEM) ou relações entre o NDVI e a emissividade (NBEM), (2) métodos fisicamente embasados, que assumem que os efeitos atmosféricos sobre a radiância medida no topo da atmosfera já estão incorporados na estimativa da radiância no solo ou então a radiância é medida no nível do solo e (3) os métodos multicanais que estimam a emissividade da superfície terrestre a partir da radiância emitida pela superfície e seu espectro (LI et al., 2013; SOBRINO et al., 2008b).

Todos os métodos acima descritos apresentam incertezas dada a interferência da atmosfera nos dados radiométricos, porém os erros sistemáticos têm pouco impacto na estimativa da emissividade e os ruídos de 0.1 a 0.3 Kelvin provenientes dos instrumentos de medição induzem a erros na emissividade em torno 0.002 a 0.005 (LI et al., 2013).

Nesta pesquisa a emissividade das superfícies (ϵ) foi estimada a partir de um método semi empírico, onde a emissividade é estimada a partir da imagem de NDVI. O método utilizado foi o “Método dos limites” (“*Threshold Method*”), cujo cálculo é baseado na razão entre vegetação e solo exposto (SOBRINO; RAISSOUNI, 2000). Neste método a emissividade inferida a cada pixel é obtida a partir do NDVI de cada pixel (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Limites de NDVI para a estimativa da emissividade (ϵ)

NDVI	LSE (ϵ)	Característica do Pixel
NDVI < 0	0,991	Pixel com água
0 <= NDVI < 0,2	0,964	Pixel sem vegetação
0,2 <= NDVI <= 0,5	$\epsilon_v * FCV + \epsilon_s(1 - FVC) + C_s$	Pixel misto
NDVI > 0,5	0,984	Pixel com vegetação

Fonte: Adaptado de: Jin et al., (2015), Sobrino et al. (2008) e Sobrino; Raissouni (2000).

Neste processo, para os pixels com água ou NDVI < 0 é inferida $\epsilon=0,991$, para pixels com predominância de vegetação ou NDVI > 0,5, $\epsilon=0,984$, para pixels com predominância de solo exposto ou sem vegetação ou NDVI entre 0 e 0,2, $\epsilon=0,964$, e para pixels heterogêneos, que não se enquadram em nenhuma das classes anteriores a ϵ é aferida a partir da Equação

3.5 (JIN et al., 2015; SOBRINO et al., 2008a; SOBRINO; RAISSOUNI, 2000) e os dados de FCV estimados na etapa anterior foram utilizados. Os valores de emissividade foram estabelecidos a partir do banco de dados espectrais Aster (ECOSTRESS, 2019).

$$\varepsilon_{mix} = \varepsilon_v * FCV + \varepsilon_s * (1 - FCV) + C_s \quad (3.5)$$

ε_{mix} _ emissividade para pixels mistos ou heterogêneos;

ε_s _ emissividade do solo;

ε_v _ emissividade da vegetação;

FCV _ fração de cobertura de vegetação;

C_s _ efeito de cavidade.

O efeito da cavidade da superfície (C_s) deve ser incorporado no cálculo da emissividade de pixels mistos, cujos valores de NDVI ocorrem entre 0,2 e 0,5 ($0,2 \leq NDVI \leq 0,5$). O efeito de cavidade (C_s) é utilizado para representar a rugosidade de superfícies heterogêneas e é calculado através do modelo dado pela Equação 3.6, que considera a geometria das superfícies, representada pelo fator geométrico (F) (SOBRINO; CASELLES; BECKER, 1990). O fator geométrico (F) utilizado o cálculo do efeito de cavidade pode variar de 0 a 1. Em uma superfície totalmente plana o fator geométrico é 0. Em superfícies mistas e não uniformes considera-se $F= 0.55$ (SOBRINO; RAISSOUNI, 2000).

$$C_s = (1 - \varepsilon_s) * \varepsilon_v * F * (1 - FVC) \quad (3.6)$$

C_s _ efeito de cavidade

ε_s _ emissividade do solo

ε_v _ emissividade da vegetação

F _ fator geométrico (0,55)

FCV _ fração de cobertura de vegetação

3.3.3 Albedo ou refletância das superfícies (A)

O Albedo das superfícies (A) foi estimado a partir dos produtos de refletância no topo da atmosfera (TOA), da coleção Landsat-8 Level-2, utilizando-se o método desenvolvido por Tasumi, Allen e Trezza (2008), para ser utilizado em imagens de alta resolução espacial como as do satélite *Landsat*, com resolução espacial de 30 metros, e aplicações para utilização de imagens do MODIS com resolução de 500 metros.

Neste método, o albedo das superfícies é estimado em duas etapas. Na primeira etapa, estima-se o albedo no topo da atmosfera (A_{toa}) a partir da utilização de valores de ponderação (W_b) para cada banda de refletância no topo da atmosfera, que remete ao espectro da radiação solar (Equação 3.7) (TASUMI; ALLEN; TREZZA, 2008; WATERS et al., 2002).

$$A_{TOA} = \sum_{b=1}^7 [A_{s,b} * W_b] \quad (3.7)$$

A_{TOA} : albedo integrado no topo da atmosfera (0.3-4,0 μ m)

b: banda de refletância

W_b : coeficiente de ponderação para cada banda de referência

O coeficiente de ponderação (W_b) é estabelecido para o intervalo de comprimentos de onda entre 0,3 e 4,0 μ m, intervalo que cobre aproximadamente 98% da radiação solar que incide na superfície terrestre. Neste processo assume-se que a reflexão entre bandas do satélite pode ser obtida por interpolação linear para as bandas vizinhas, cujos comprimentos de onda não são captados pelo sensor a bordo do satélite dado aos processos de atenuação atmosférica. (TASUMI, ALLEN, TREZZA, 2008). O coeficiente de ponderação é obtido de acordo com a Equação 3.8 e seus valores seguem descritos na Tabela 3.7, para as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do *Landsat 8*.

$$W_b = \frac{\int_{LO_b}^{UP_b} R_{s\lambda} * d\lambda}{\int_{0.3}^{4.0} R_{s\lambda} * d\lambda} \quad (3.8)$$

W_b : coeficiente de ponderação

$R_{s\lambda}$: radiação solar espectral hemisférica na superfície para um determinado intervalo de comprimento de onda

UP_b : comprimento de onda máximo (μ m)

LO_b : comprimento de onda mínimo (μ m)

Tabela 3.7 - Coeficientes de ponderação (W_b) utilizados para estimar A_{TOA}

Coeficientes de Ponderação (W_b)						
Landsat 8	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
W_b	0.293	0.274	0.233	0.157	0.033	0.036

Fonte: Waters et al. (2002).

Na segunda etapa, para obtenção do albedo na superfície (A), incorpora-se as correções relativas à refletância e transmissividade do ar (Equação 3.9 e Equação 3.10).

$$A = \frac{A_{TOA} - A_{ATM}}{T_{sw}^2} \quad (3.9)$$

$$T_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (3.10)$$

A: albedo na superfície;

A_{TOA} : albedo no topo da atmosfera;

A_{ATM} : albedo atmosférico;
 T_{SW} : transmissividade da radiação solar no ar ;
 Z : elevação acima do nível do mar (600m em SJC).

3.3.4 Índice de umidade por diferença normalizada (NDMI)

O índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) (GAO, 1996), também chamado de índice de água (NDWI), é utilizado para averiguar o conteúdo de água em áreas verdes ou para acompanhar as mudanças da biomassa e estresses de umidade nas plantas (JENSEN, 2009). A estimativa do NDMI, utilizando-se imagens do satélite *Landsat*, é realizada a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de onda curta (SWIR). Sua estimativa a partir das imagens do satélite *Landsat* 8, é feita utilizando-se as bandas 5 e 6, para representar o intervalo do NIR e SWIR respectivamente (Equação 3.11).

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (3.11)$$

NDMI_índice de umidade por diferença normalizada
 NIR_infravermelho próximo
 SWIR_infravermelho de onda curta

3.3.5 Temperatura da superfície terrestre (TS)

A metodologia utilizada para o cálculo da TS, na área de estudos, foi escolhida considerando-se que as imagens de temperatura de brilho (TB) no topo da atmosfera, da coleção Level-2 do satélite *Landsat*, já passaram por um processo de correção atmosférica. Neste sentido, a TS foi estimada a partir da Equação 3.12, descrita anteriormente (Apêndice A), que considera os efeitos da emissividade (ϵ) na TS (ARTIS; CARNAHAN, 1982).

$$TS = \frac{TB}{1 + \left(\frac{\lambda \cdot TB}{\rho}\right) \cdot \ln \epsilon} \quad (3.12)$$

TS: temperatura da superfície (°C);
 TB: temperatura de brilho (K);
 λ : comprimento médio de onda emitido no intervalo da Banda 10 do L8 (10,895 μ m);
 ρ : 1,438 * 10⁻² m K;
 Ln: logaritmo natural;
 ϵ : emissividade da superfície.

3.3.6 Calor Antropogênico (Q_F)

A estimativa do calor antropogênico (Q_F) foi feita utilizando-se um método simplificado, dada a indisponibilidade dos dados disponíveis para a área de estudos. O dimensionamento do calor antropogênico foi feito com base no consumo de energia considerando somente o

setor de edificações. O cálculo do Q_f foi feito com base no consumo de energia elétrica por habitante por ano (Watts/habitante.ano), que na região Sudeste brasileira foi de 342,5 Watts/habitante.ano (SÃO PAULO, 2020), e densidade demográfica nos setores sócio econômicos na área de estudos (habitantes/m²) (PMSJC, [s.d.]), de acordo com a Equação 3.13.

$$Q_f = \text{EneElétrica} \times \text{DensDemo} \quad (3.13)$$

Q_f : calor antropogênico por setor sócio econômico (Watts/m².ano)

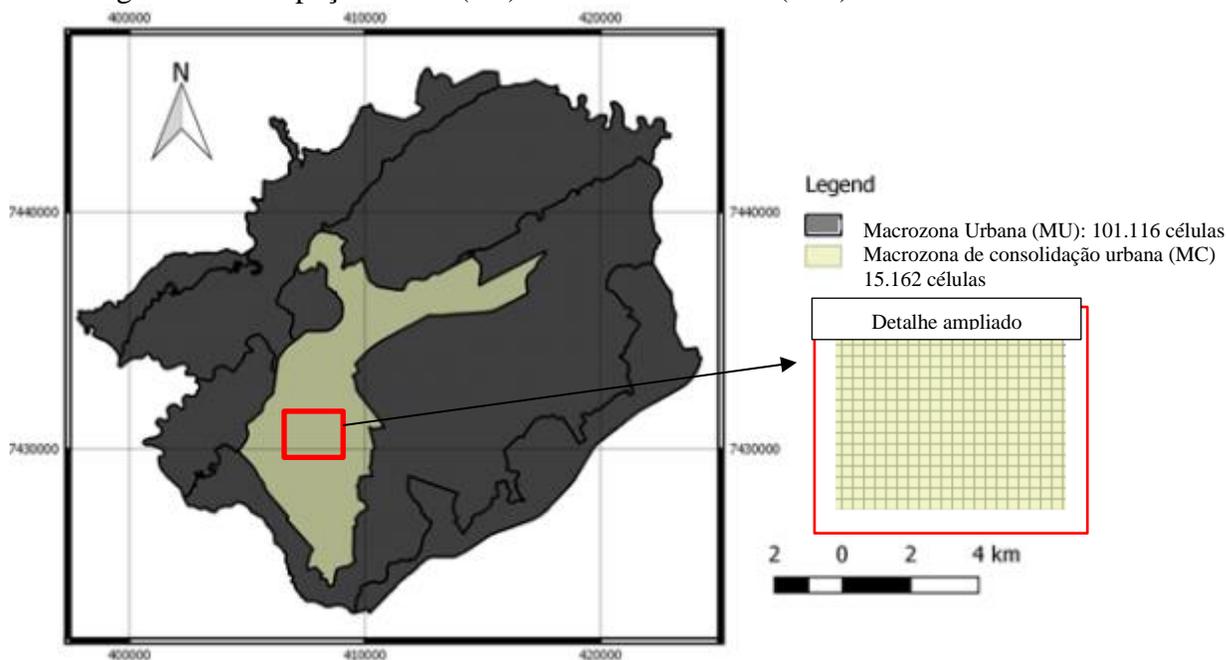
EneElétrica: Consumo de energia elétrica por habitante por ano (Watts/habitante.ano)

DensDemo: Densidade demográfica por setor sócio econômico (habitantes/m²).

3.4 Integração e verificação dos dados no espaço celular

O mapeamento e integração dos dados foi feito a partir da criação do espaço celular (CS), onde o polígono delimitado pela macrozona urbana (MU) foi discretizado em 100.116 células, com dimensão de 60 x 60 metros ou 3600m². A resolução espacial adotada (60x60 metros), foi utilizada pois permite representar diferentes escalas horizontais de abrangência, dependendo do número de células que se agrupa e facilitar a manipulação do conjunto de dados, sem comprometer a capacidade de processamento por computadores convencionais (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Espaço celular (CS): macrozona urbana (MU) de SJC.



Fonte: Produção do autor.

A criação do espaço celular (CS), consolidado em um arquivo *shapefile* (shp), e o preenchimento dos atributos das células ou amostras, foi feito no “*FillCell*” (INPE, [s.d.]). O preenchimento das células foi feito utilizando-se o operador “*average*”, que calcula o valor do atributo a partir da média dos valores dos pixels dentro da área de cada célula. Neste sentido, a temperatura da superfície (TS), bem como todos os valores utilizados para representar as variáveis espectrais, definem-se como a média dos valores dos pixels, estimados a partir das imagens do satélite Landsat8, que se encontram dentro da célula definida na discretização do espaço.

A verificação dos resultados, estimados nesta pesquisa por satélites, foi feita no sentido de avaliar a adequabilidade dos valores obtidos, visto que os experimentos em campo não foram objeto desta pesquisa.

A verificação dos resultados obtidos para ao FCV, albedo, emissividade e NDMI, foi feita comparando-se os resultados estimados nesta pesquisa, com os resultados obtidos em outras pesquisas, que são utilizados como parâmetros, na modelagem do clima urbano (AKBARI; MENON; ROSENFELD, 2009; BECHTEL; DANEKE, 2012; CHUVIECO; HUETE, 2010; DU et al., 2015; JIN et al., 2015; WANG et al., 2015; WATERS et al., 2002).

O processo de verificação por comparação foi feito a partir da criação de 5 novos conjuntos de dados. Os novos conjuntos de dados, utilizados para verificar a adequabilidade dos resultados, foram definidos a partir dos tipos de cobertura do solo encontrados na área de estudos: vegetação densa, vegetação rasteira ou pasto, solo exposto, área urbanizada (ZCL3) e água. Para comparação dos resultados, os valores medianos, obtidos para cada novo conjunto de dados, obtidos através da seleção de amostras na macrozona urbana de SJC, foram utilizados, com o objetivo de minimizar os impactos de resultados extremos.

A verificação dos valores de temperatura da superfície (TS) obtidos na área de estudos, foi feita pela comparação dos dados de TS, obtidos no pixel da estação meteorológica e os dados de temperatura do ar (Tar) medidos na hora da aquisição das imagens (13:00hs UTC ou 10:00hs local). Neste procedimento, os dados obtidos nas nove datas analisadas, foram inseridos num diagrama de dispersão e o coeficiente de determinação (R^2) (MARÔCO, 2007) calculado para avaliar esta relação.

3.5 Análises Exploratórias

As análises exploratórias consistem em métodos que tem como base os princípios da estatística descritiva, e são utilizadas para identificar padrões, associações ou interdependências entre as variáveis de conjuntos de dados, bem como identificar padrões de ocorrência, tendências ou resultados extremos. Nesta pesquisa, as análises exploratórias foram realizadas em quatro etapas: análise de correlação, análise de auto correlação espacial, análise de *clusters* de TS e análise de outliers de TS; e foram obtidas através dos dados obtidos para a macrozona de consolidação urbana (MC), porção do território que concentra a maior parte das atividades urbanas no município.

As análises de correlação e análise de outliers foram realizadas utilizando-se as 9 imagens selecionadas, descritas na Tabela 3.2, já as análises de autocorrelação espacial e análises de *clusters* foram feitas utilizando-se somente as imagens de 2014 e 2015, para evitar que alterações no uso e ocupação do solo provocassem perturbações nos resultados.

As análises de correlação foram feitas utilizando-se o coeficiente de correlação de *Spearman* (ρ_s), utilizado para dados não paramétricos (MARÔCO, 2007). O coeficiente de correlação de *Spearman* é utilizado para dados não paramétricos, pois não exige pressuposto quanto a forma de distribuição dos dados. Os valores dos coeficientes de correlação podem variar de 1 a -1, quanto mais próximos a 1 maior a correlação positiva entre as variáveis, e quanto mais próximo de -1 maior correlação negativa (MARÔCO, 2007). As análises de correlação foram realizadas em duas fases: na primeira, a TS foi definida como variável dependente (Y), e albedo (A), emissividade (ϵ), fração de cobertura de vegetação (FCV), NDMI e calor antropogênico (Q_f) foram definidas como variáveis explicativas (X). Na segunda, os valores de correlação foram calculado para averiguar a correlação entre todas as variáveis. As análises foram feitas utilizando-se o programa “R Studio”, para todas as datas selecionadas, onde foram calculados os coeficientes de correlação de *Spearman*.

A segunda etapa foi realizada para verificar a dependência espacial de TS num mesmo ano e entre diferentes estações do ano, utilizando-se as imagens de 2014 e 2015. A dependência espacial da temperatura das superfícies foi utilizada com o objetivo de identificar as áreas “chave” para a compreensão da dinâmica do clima urbano. Nesta pesquisa, as áreas “chave” são denominadas “pontos quentes” e “sumidouros de calor”, dependendo de seu desempenho térmico. Como “pontos quentes” definem-se as áreas onde são observadas as maiores diferenças entre a temperatura da superfície e temperatura do ar, e como “sumidouros de calor”, áreas onde são observadas as menores diferenças entre temperatura do ar e temperatura das superfícies. O desempenho térmico das superfícies está associado a diferença entre a temperatura das superfícies e temperatura do ar, pois quanto menor a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura das superfícies, menor a transmissão de calor, da superfície para o ar. Enquanto os “pontos quentes” consistem em áreas que induzem ao aumento da temperatura do ar (Tar) e promovem a retroalimentação positiva do sistema climático urbano, os “sumidouros de calor” auxiliam na atenuação das TS, promovendo a retroalimentação negativa do sistema climático e auxiliando na redução da (Tar).

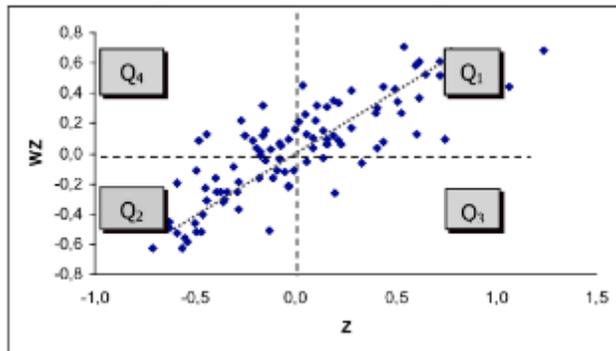
A dependência espacial foi estimada a partir do índice global de *Moran* (I) (MORAN, 1950) e do índice local de associação espacial (LISA)(ANSELIN, 2010). Estes índices são calculados com base nos valores normalizados (z), que correspondem aos valores de atributos subtraídos de sua média e divididos pelo desvio padrão, o que permite comparar os valores normalizados dos atributos numa área com a média de seus vizinhos (wz). O índice global de *Moran* fornece um valor único como medida de associação espacial para todo o conjunto de dados de uma determinada região, enquanto o LISA fornece uma medida de associação para cada área, permitindo a identificações de agrupamentos. A soma individual do LISA para uma área delimitada, corresponde ao índice global de *Moran*. No mapeamento dos índices da autocorrelação espacial, as células ou amostras são classificadas considerando-se

os valores obtidos para seu vizinho mais próximo, definido a partir da matriz de vizinhança ou contiguidade (W) (ANSELIN, 2010)

Os resultados das associações espaciais estimadas neste processo podem ser visualizados no diagrama de espalhamento de *Moran*, que é uma representação gráfica bidimensional, dividida em quatro quadrantes (

Figura 3.15). Neste diagrama, os dados podem ser analisados em função de sua distribuição em cada quadrante. Os quadrantes 1 e 2 (Q1 e Q2) indicam áreas de associação espacial positiva, ou seja, áreas associadas a vizinhos que possuem atributos com valores semelhantes. Os quadrantes 3 e 4 por sua vez, indicam áreas com associação espacial negativa, ou seja, áreas associadas a vizinhos que possuem atributos distintos. As áreas classificadas que se inserem nos quadrantes 3 e 4 são consideradas outliers espaciais (ANSELIN, 2005, 2010; DRUCK et al., 2004).

Figura 3.15 - Exemplo de diagrama de espalhamento de *Moran*.



Fonte: Druck et al. (2004).

A estimativa e mapeamento dos índices de associação espacial foram feitas através do software GeoDa . As funções utilizadas foram: a “*univariate*”, para aferir a dependência espacial da TS no espaço em uma mesma data e a “*bivariate*” para aferir a dependência espacial de TS no espaço em datas diferentes. A matriz de vizinhança ou contiguidade adotada para a aferição do índice global e local de *Moran* foi a denominada “*queen*” ou “*rainha*” de ordem 1. A matriz de vizinhança estabelecida por esse critério determina como unidades vizinhas, aquelas que tem algum ponto comum, sejam uma aresta ou vértice (ANSELIN, 2005).

A terceira etapa, denominada análise de *clusters*, utilizando as imagens de 2014 e 2015, teve como meta agrupar áreas com padrões homogêneos de TS e identificar as ZCL associadas, bem como suas características espectrais. Neste tipo de análise as áreas homogêneas são agrupadas em função de medidas de semelhança ou dissemelhança (distância) (MARÔCO, 2007). O procedimento foi realizado no GeoDa, no qual os mapas de TS, gerados para 2014 e 2015, foram agregados para o mapeamento de *clusters*. O algoritmo utilizado foi o “*K-Medians*” e a função de distância a Euclidiana (ANSELIN, 2005; GEODA, 2018). O número

de *clusters* a reter foi definido com base nas medidas de dissemelhança entre *clusters* e nas medidas de semelhança dentro dos *clusters* (MARÔCO, 2007).

A quarta e última etapa foi realizada no sentido de identificar os outliers de TS, bem como os valores medianos das características espectrais associados à variação da TS. Neste sentido, foi realizada a classificação de TS baseada na amplitude interquartil (IQR), bem como a aferição das características espectrais medianas, associadas a cada quartil de temperatura de superfície e aos resultados extremos ou outliers. Para tanto foram utilizadas as nove imagens selecionadas nesta pesquisa.

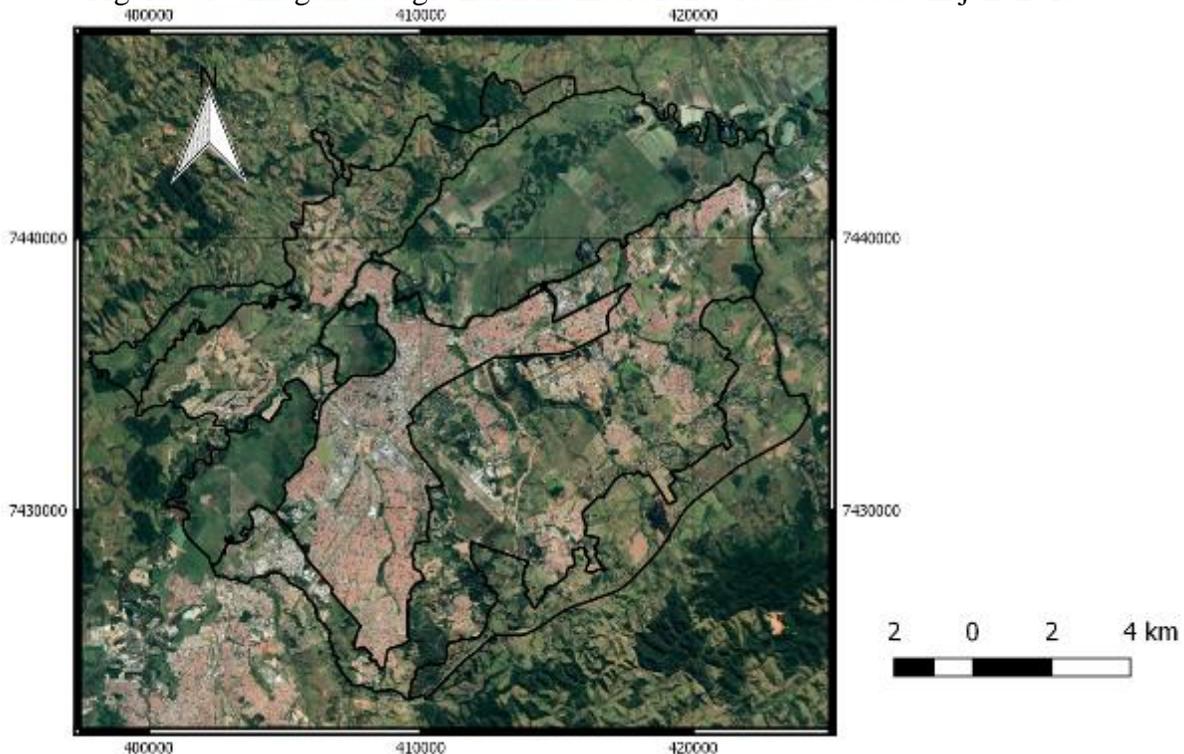
4 RESULTADOS

Para as variáveis FCV, emissividade, albedo, NDMI e TS foram elaborados dois mapas: um mapa para toda a macrozona urbana (MU) do município (Figura 4.1) e outro para a macrozona de consolidação urbana (MC) (Figura 4.2), onde as atividades urbanas estão concentradas. Para a variável calor antropogênico (Q_f) foi elaborado o mapa da macrozona urbana como um todo, visto que os limites dos setores sócio econômicos estabelecidos para análises demográficas, não corresponde aos limites da macrozonas estabelecidas pelo plano diretor do município.

Os resultados da integração das informações, compilados no espaço celular (CS), são apresentados separadamente para cada variável (Figura 4.3 a Fonte: Produção do autor.

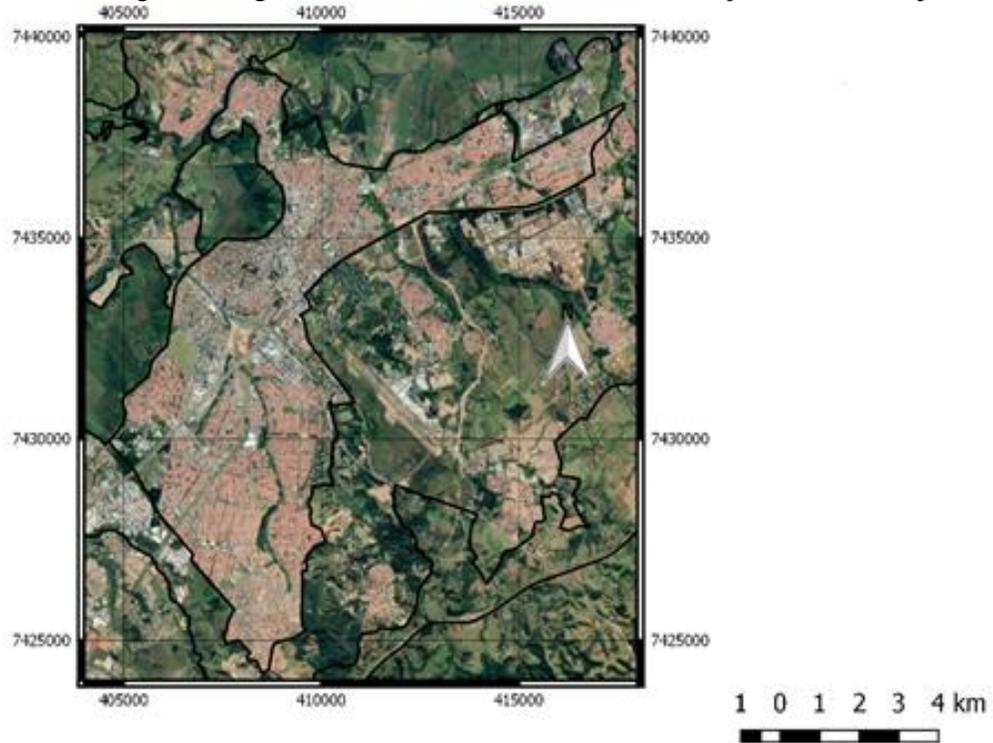
Figura 4.22). Na sequência, de cada variável mapeada, são apresentados os resultados obtidos para cada uma das 9 imagens analisadas, em forma de gráfico de caixa ou “*boxplots*”. Os gráficos resumem o conjunto de dados obtidos para as 101.116 células, que compõe a macrozona urbana (MU) e 15.162 células, que compõe a macrozona de consolidação urbana (MC), complementados por uma tabela com a síntese dos resultados.

Figura 4.1 - Imagem Google Earth na macrozona urbana de SJC em jan./2019.



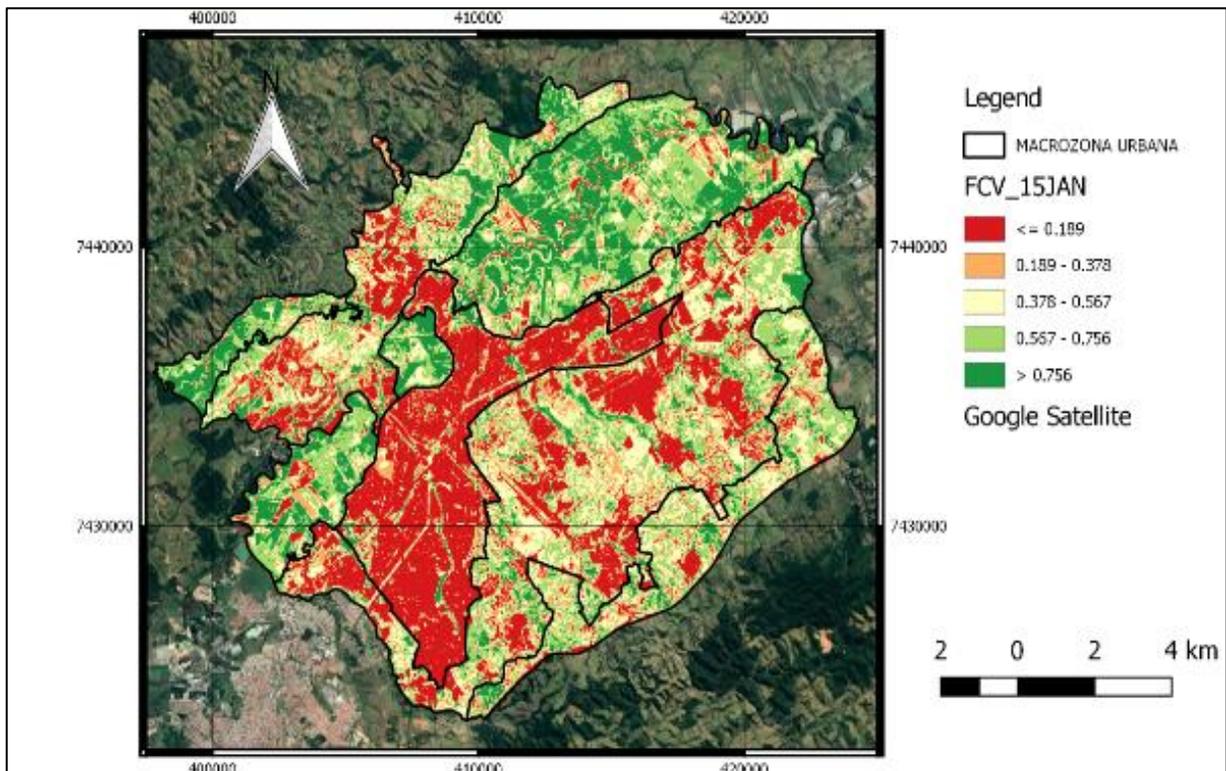
Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Figura 4.2 - Imagem Google Earth na macrozona de consolidação de SJC em jan./2019.



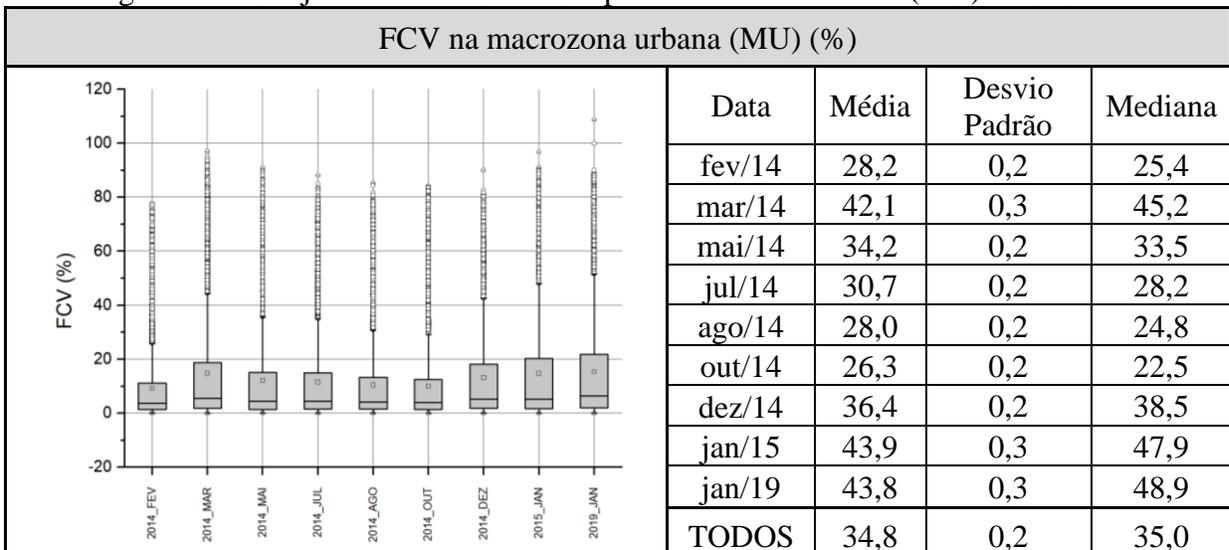
Fonte: Adaptado de “Google Earth” (2019).

Figura 4.3 - Fração de cobertura de vegetação para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.



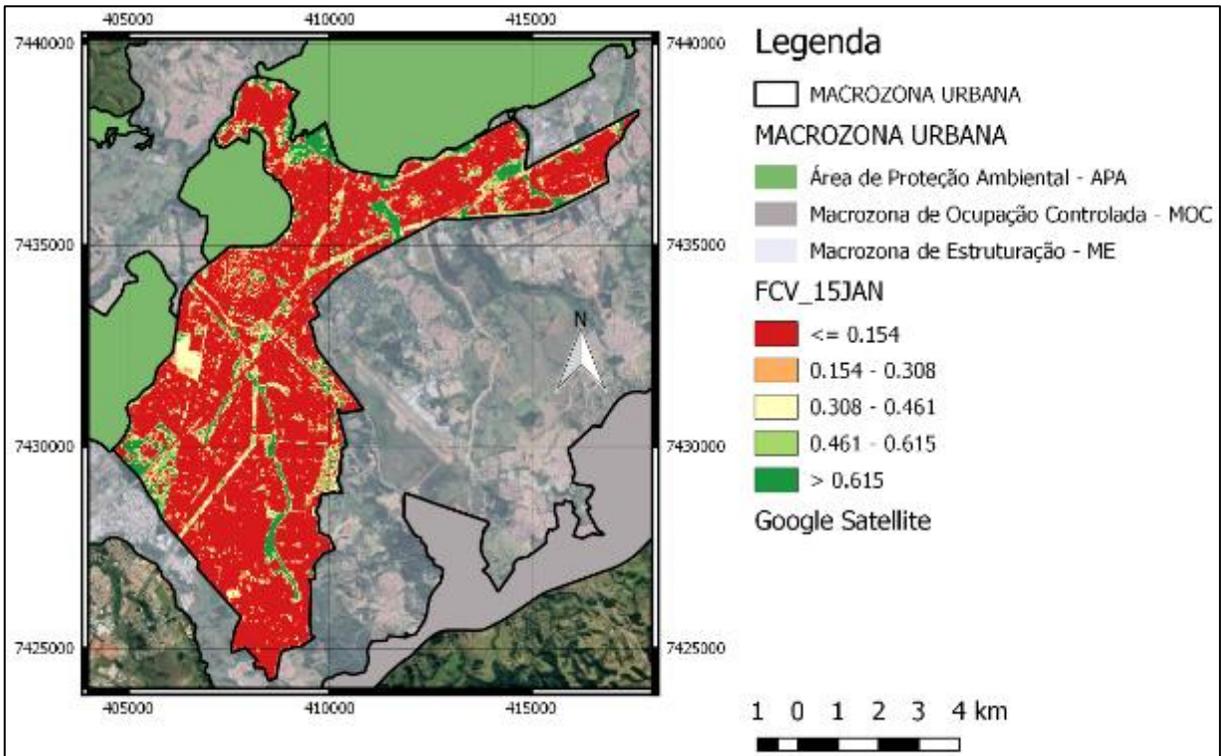
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.4 - Conjunto de dados de FCV para macrozona urbana (MU) de SJC.



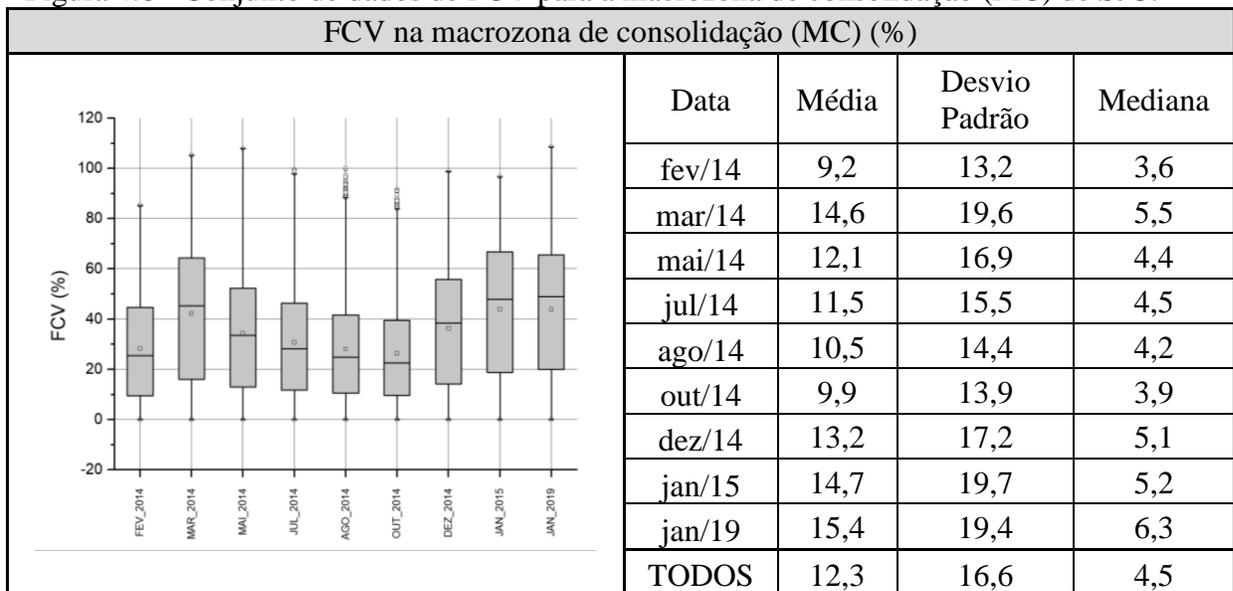
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.5 - Fração de cobertura de vegetação para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.



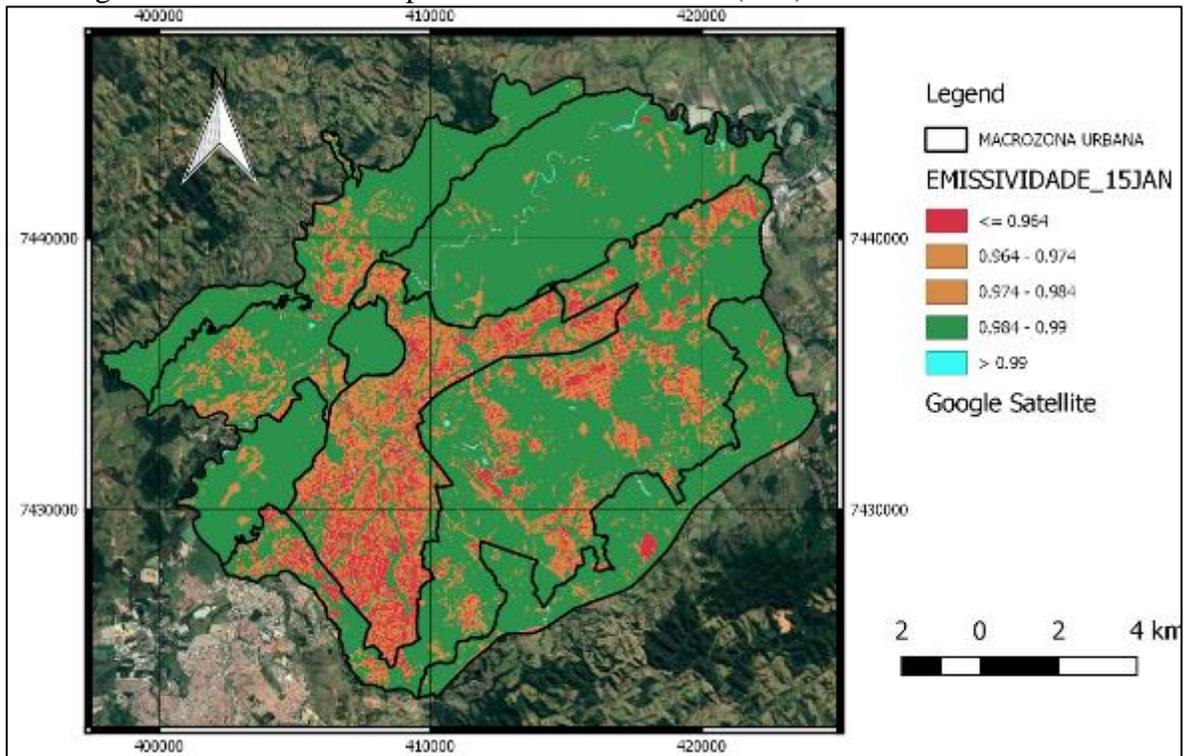
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 - Conjunto de dados de FCV para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.



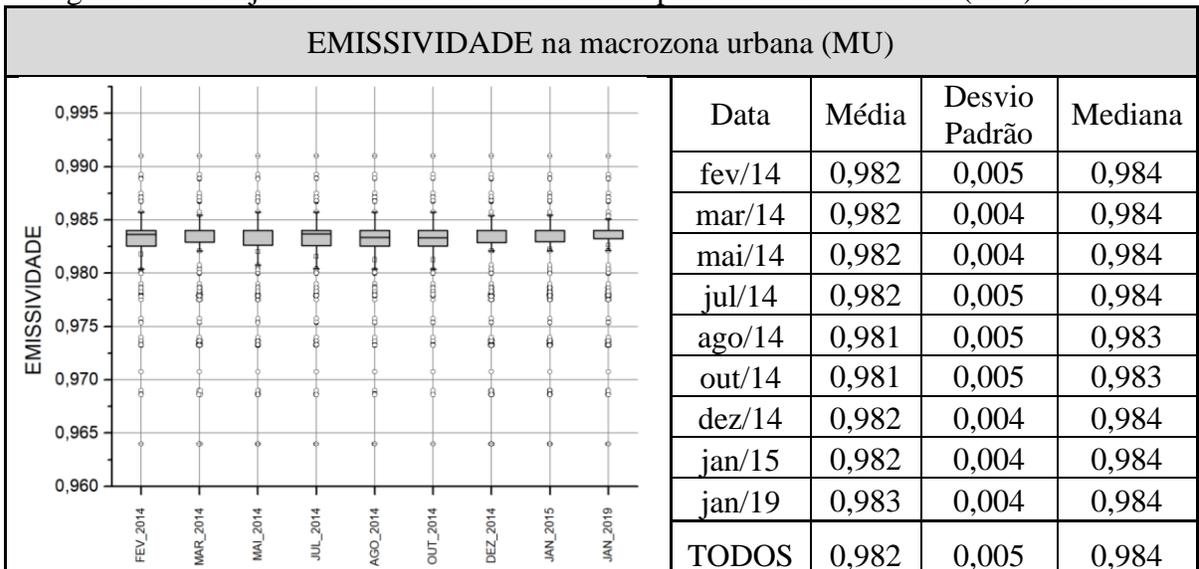
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.7 - Emissividade para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.



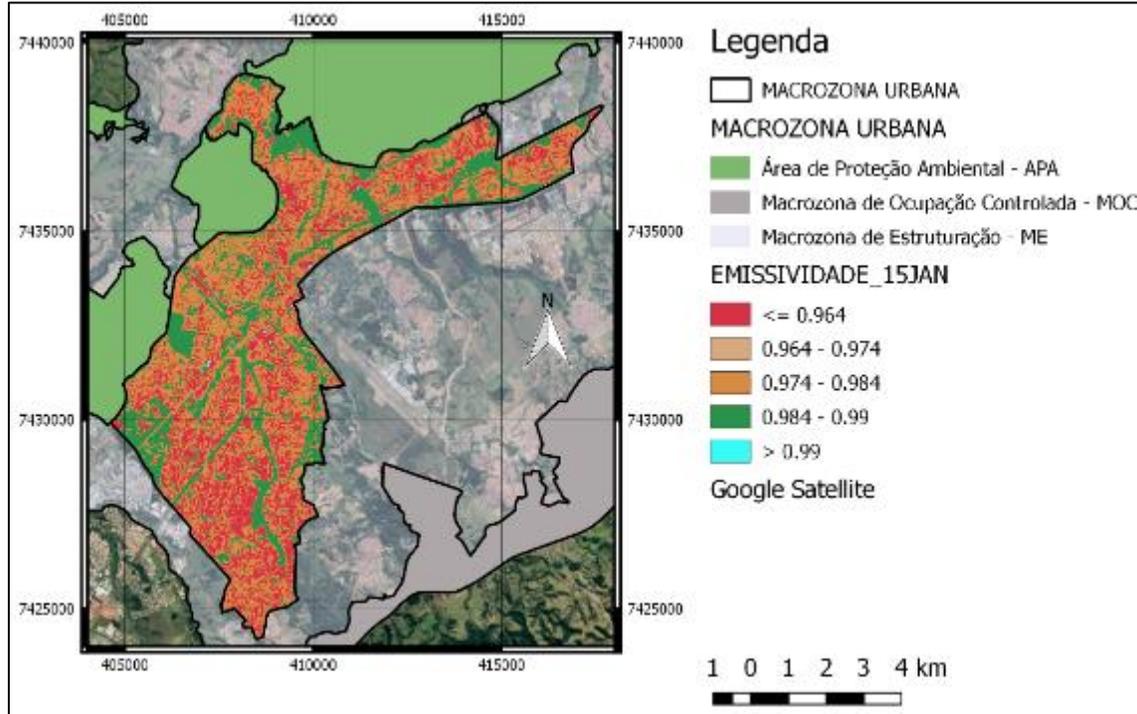
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.8 - Conjunto de dados de emissividade para macrozona urbana (MU) de SJC.



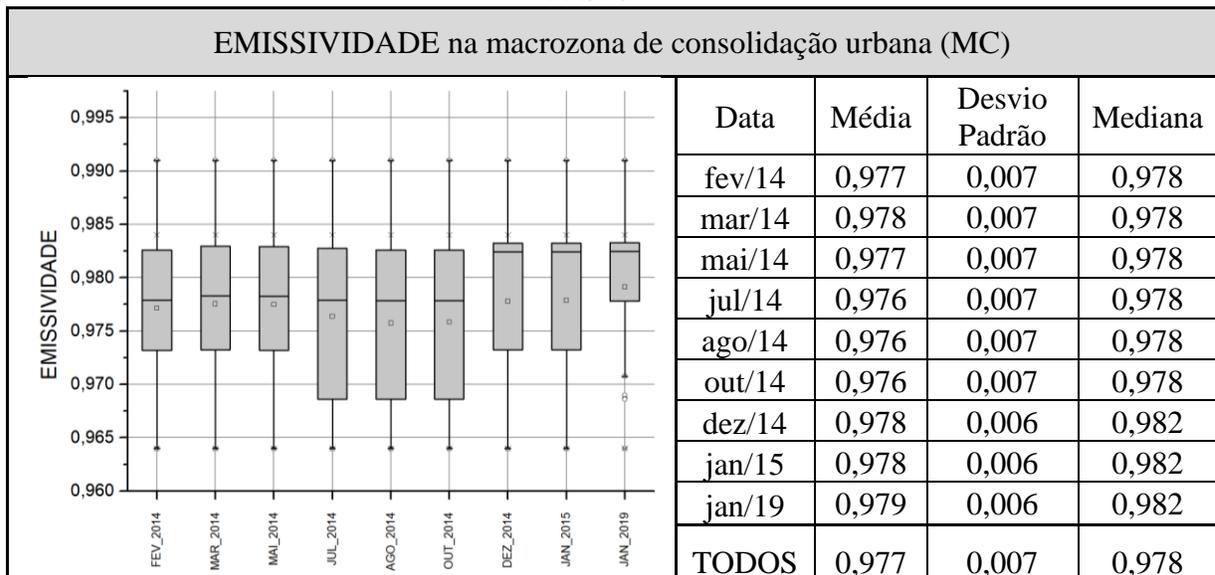
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 - Emissividade para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.



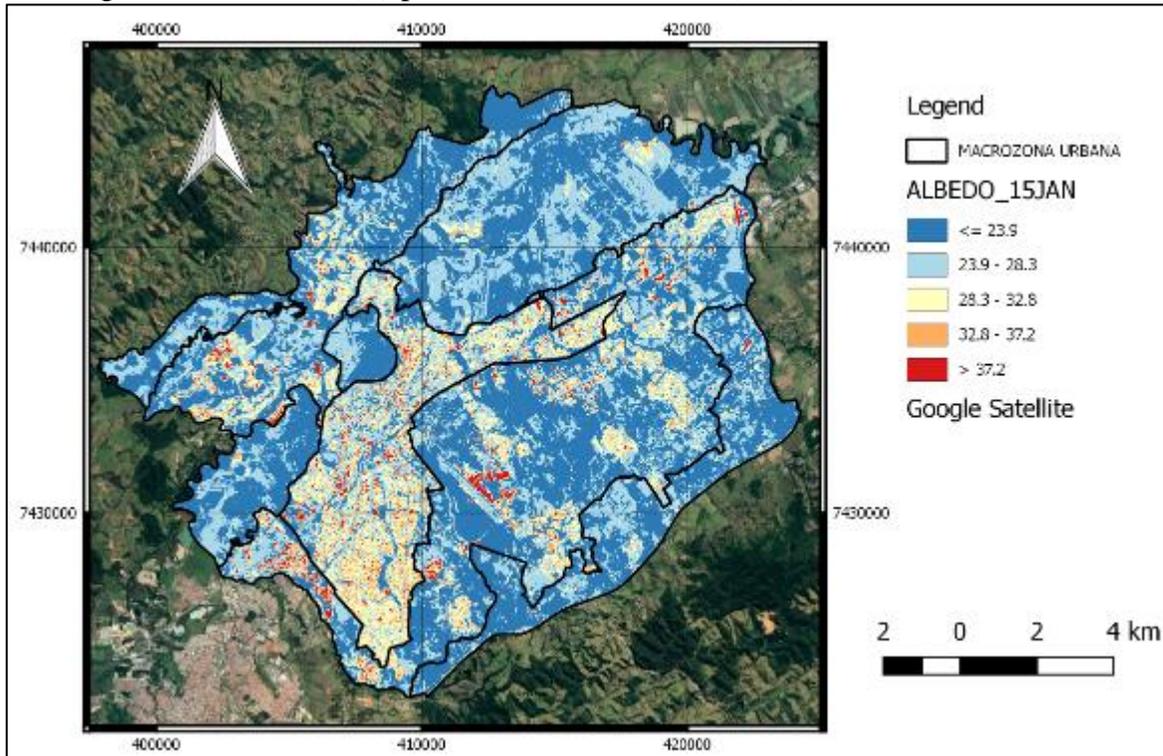
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.10 - Conjunto de dados de emissividade para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.



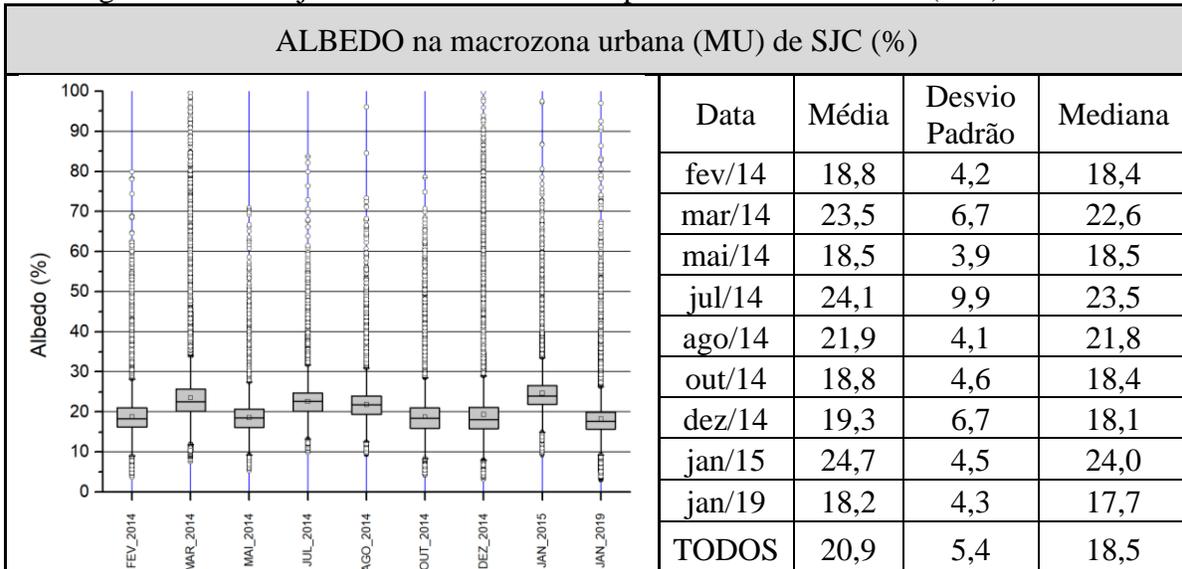
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.11 - Albedo (A) para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.



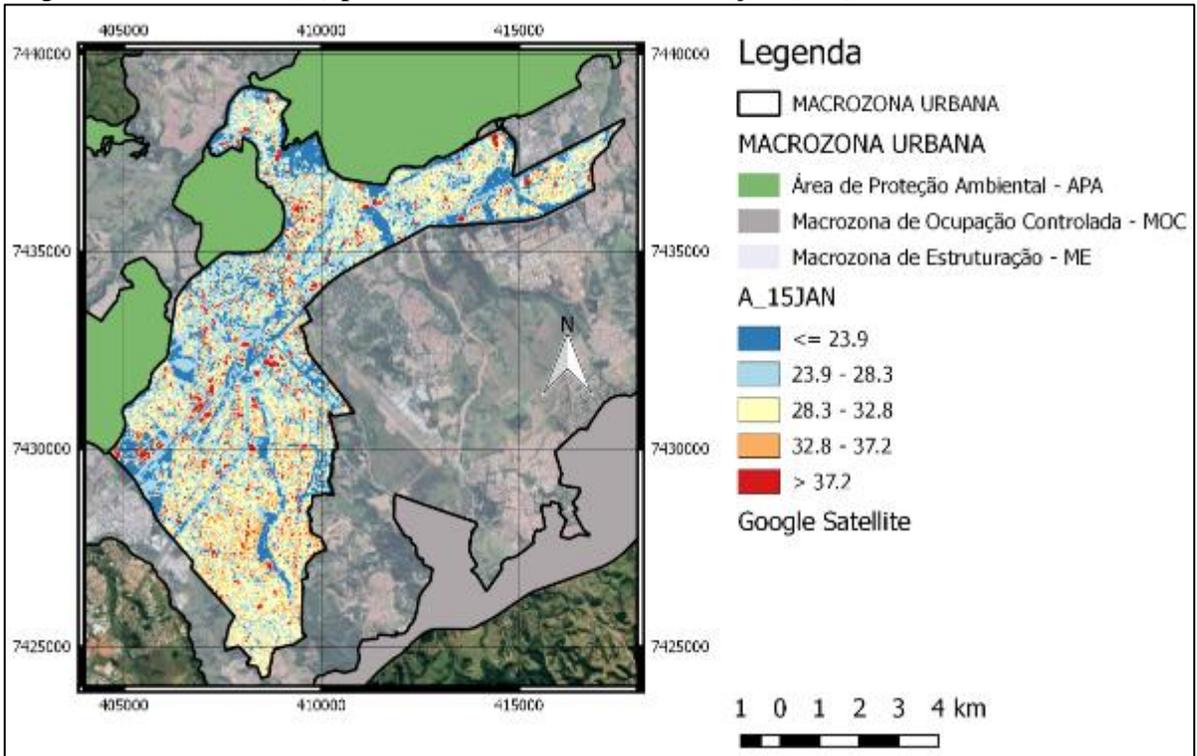
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.12 - Conjunto de dados de albedo para macrozona urbana (MU) de SJC.



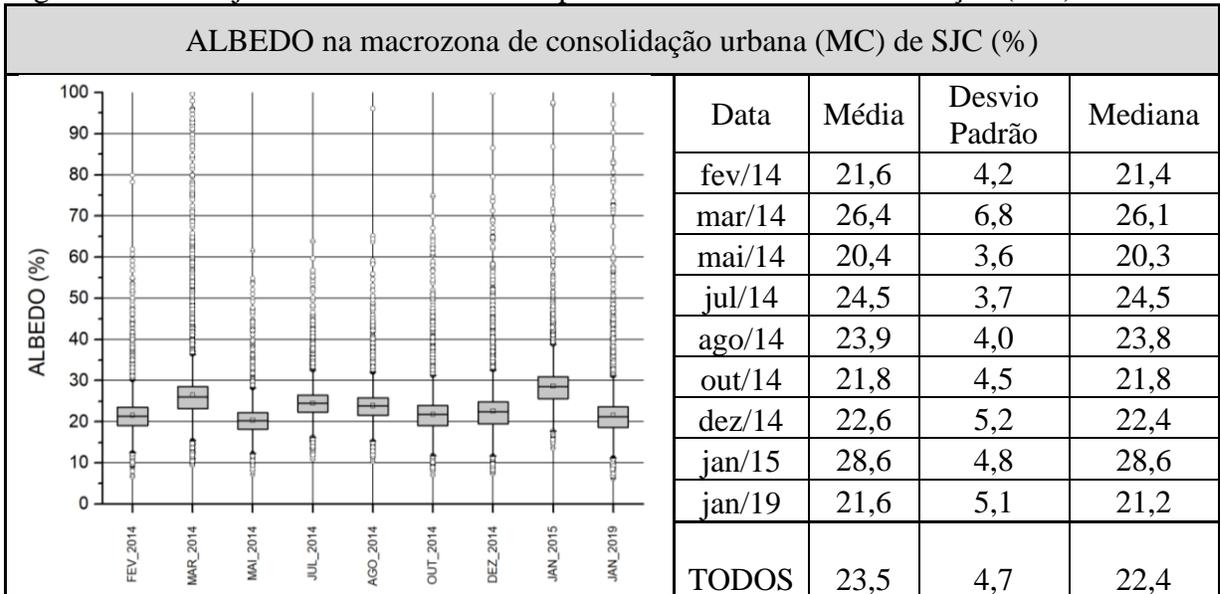
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.13 - Albedo (A) para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.



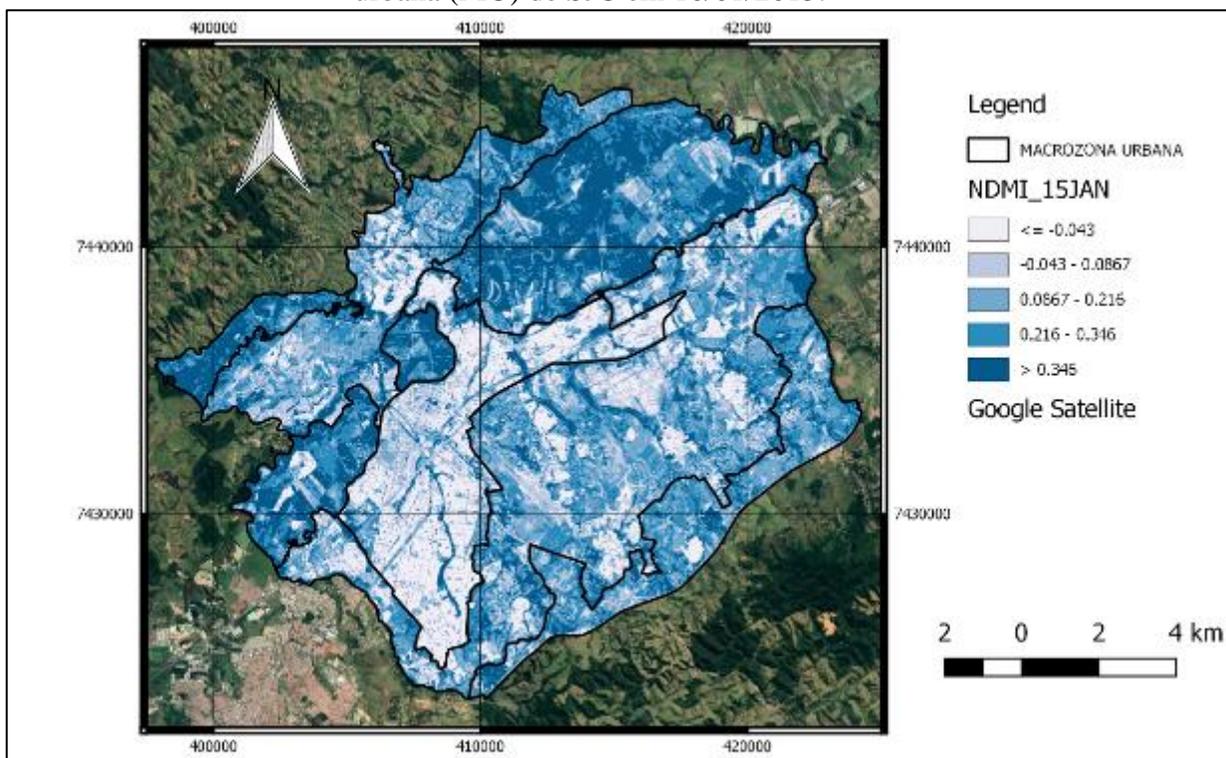
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 - Conjunto de dados de albedo para a macrozona de consolidação (MC) de SJC



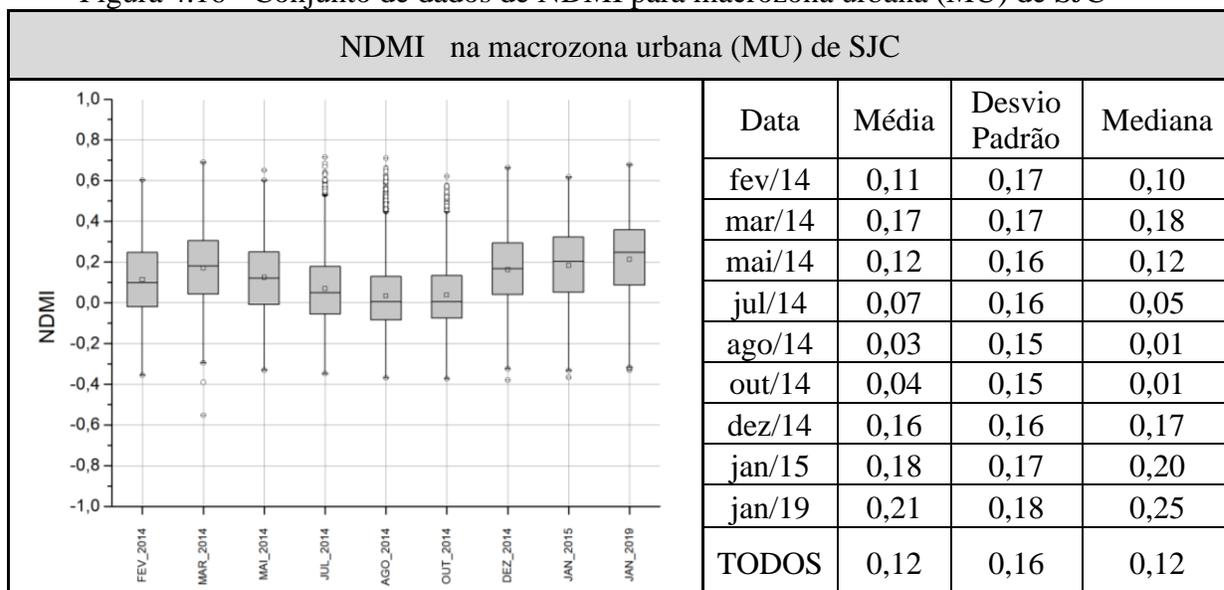
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.15 - Índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.



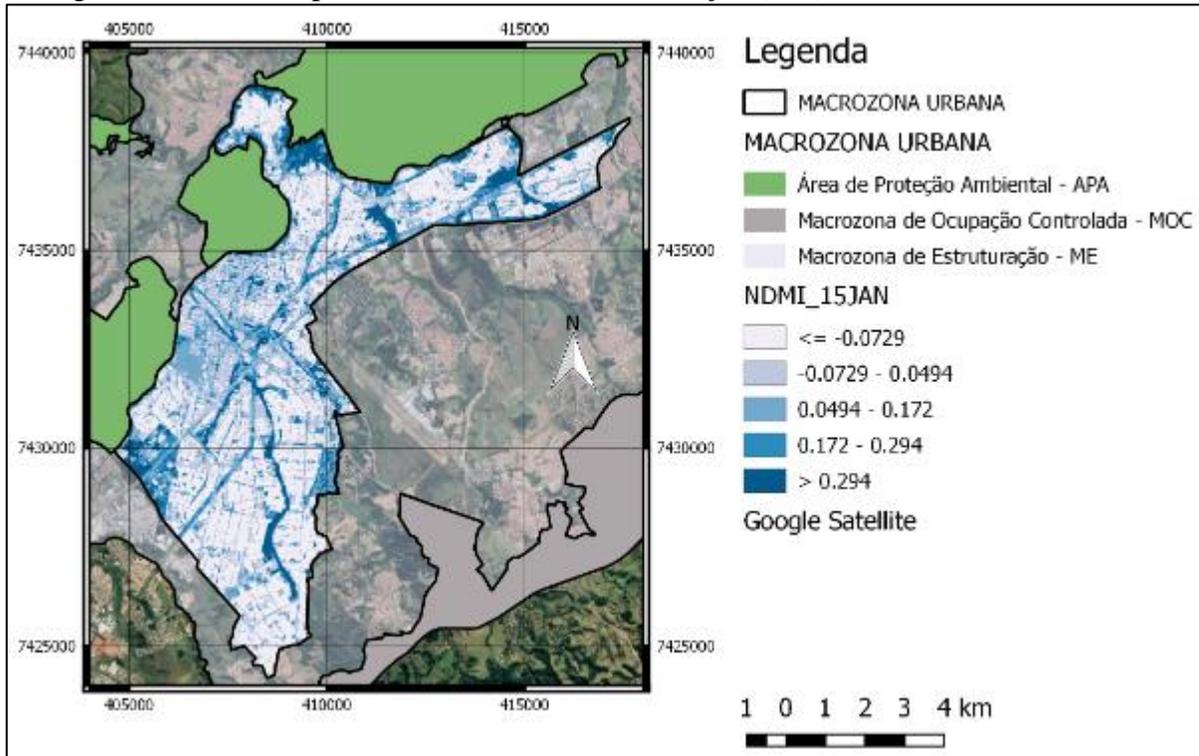
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.16 - Conjunto de dados de NDMI para macrozona urbana (MU) de SJC



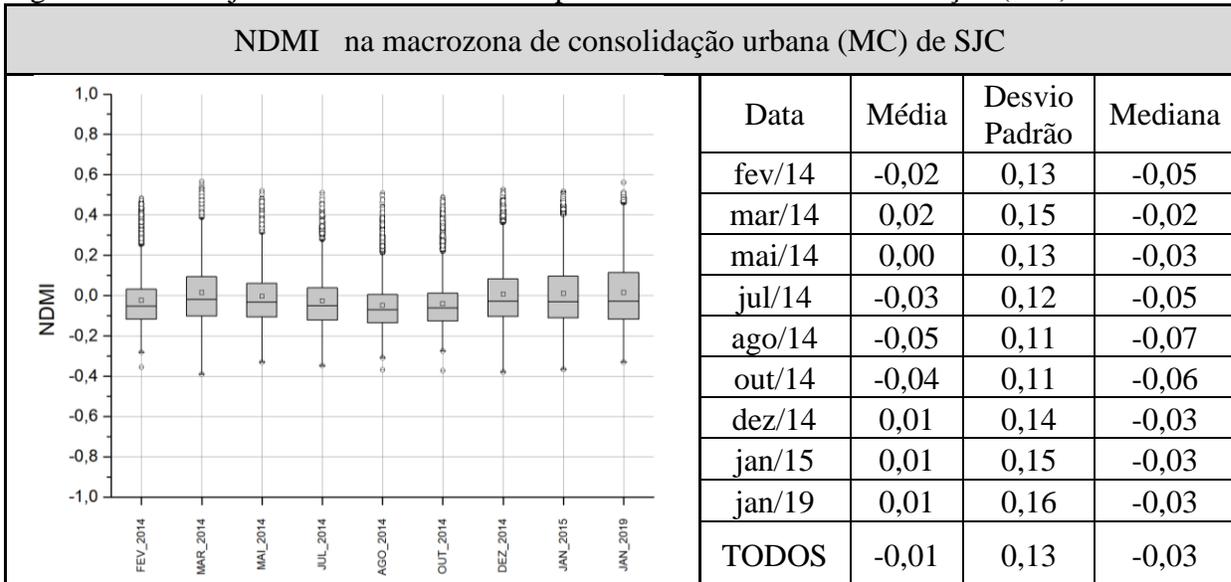
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.17 - NDMI para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.



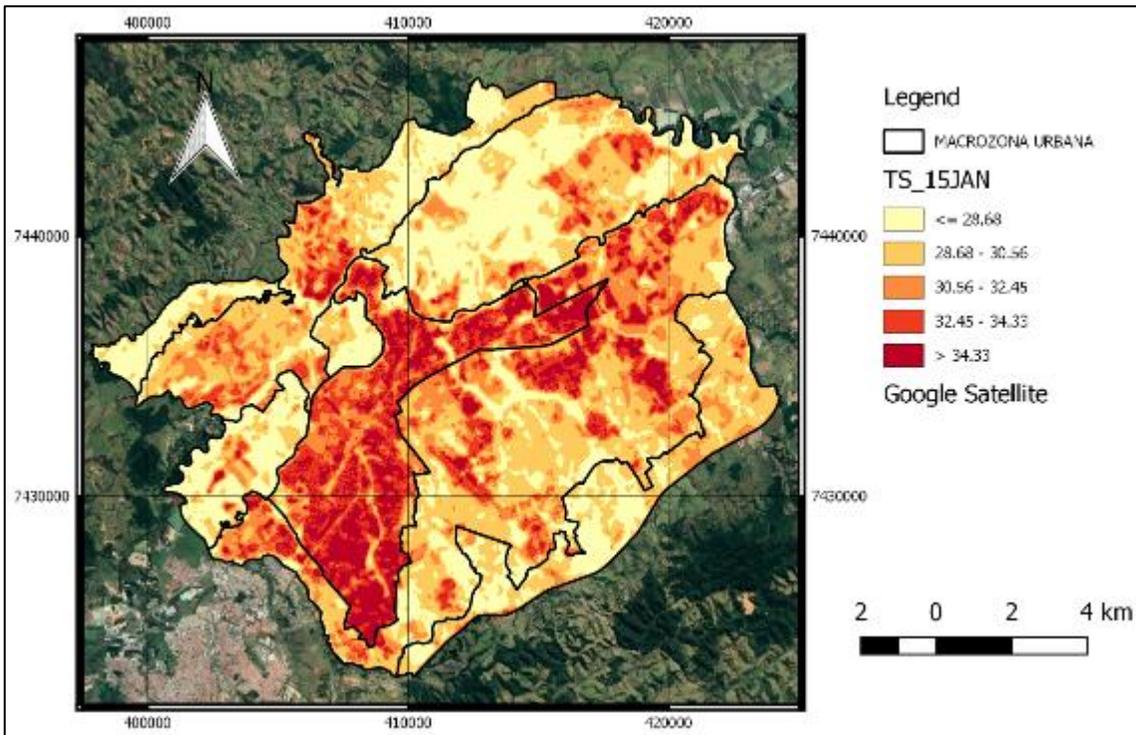
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.18 - Conjunto de dados de NDMI para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.



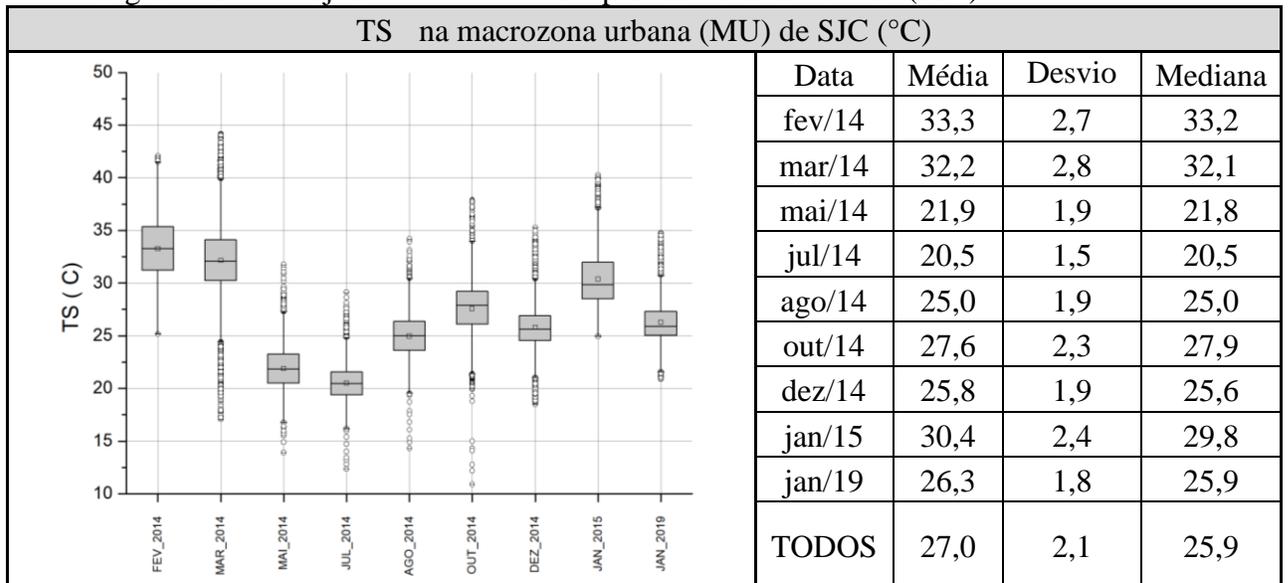
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.19 - Temperatura de superfície (TS) para a macrozona urbana (MU) de SJC em 10/01/2015.



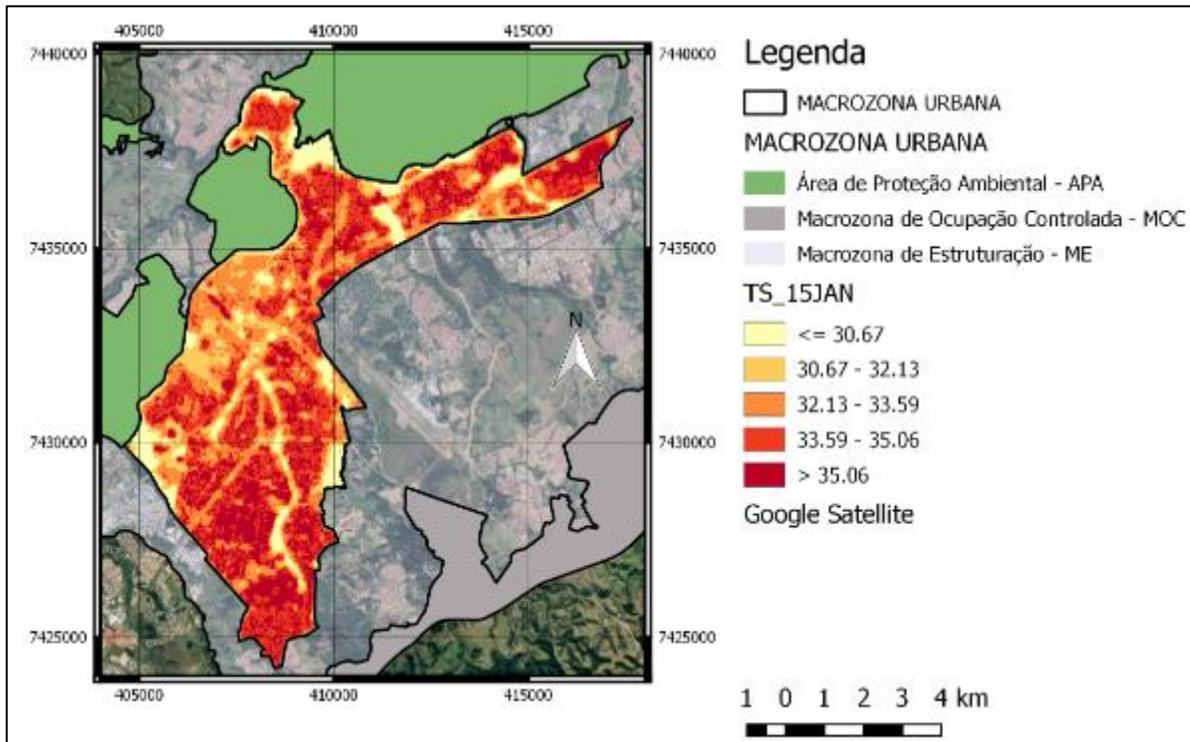
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.20 - Conjunto de dados de TS para macrozona urbana (MU) de SJC.



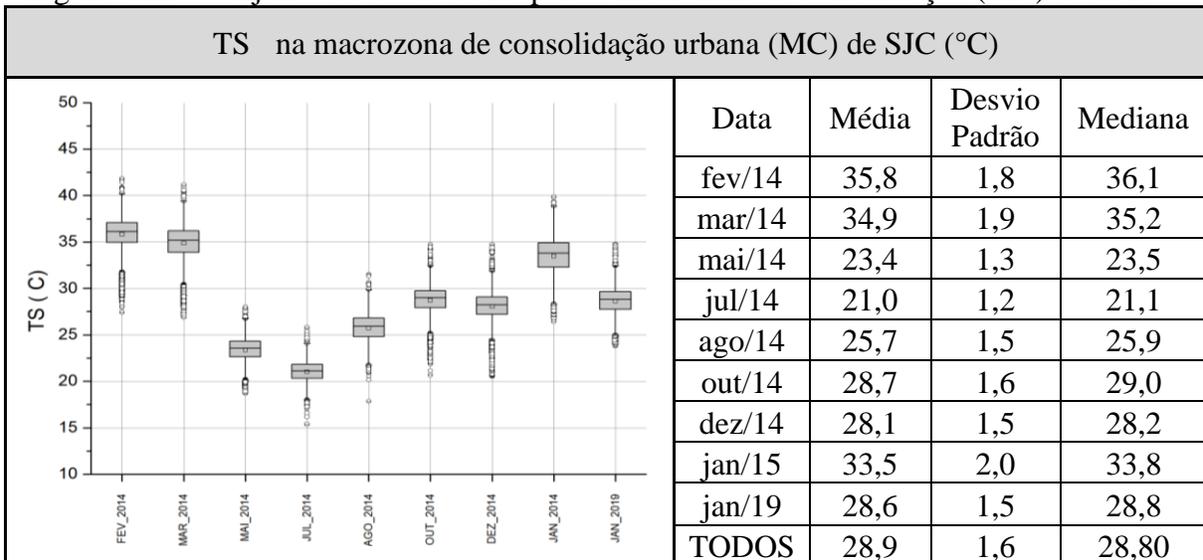
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.21- Temperatura de superfície (TS) para a macrozona de consolidação (MC) de SJC em 10/01/2015.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.22 - Conjunto de dados de TS para a macrozona de consolidação (MC) de SJC.

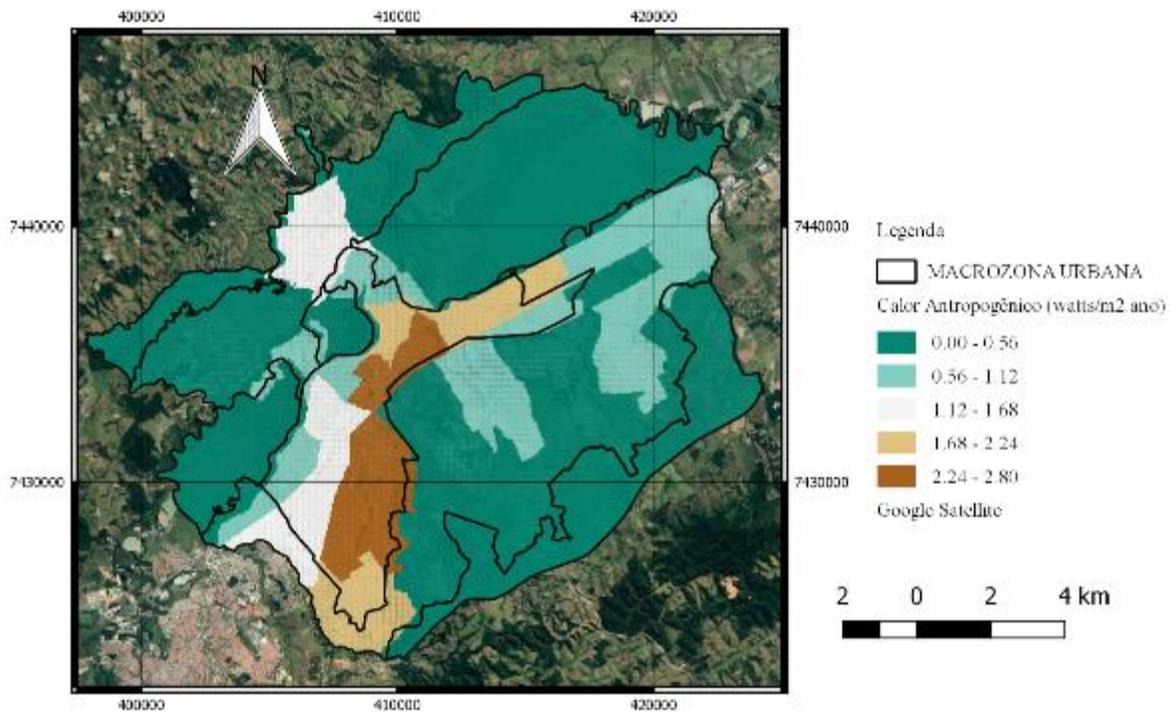


Fonte: Produção do autor.

Os resultados obtidos refletem a influência da variação climática sazonal sobre as variáveis em estudo, bem como as condições meteorológicas no período analisado. A TS mediana obtida para a MC, compilando-se o resultado de todas as imagens, foi de 28,9°C, a menor foi obtida no inverno, em 02/07/2014 (21°C) com Tar de 18°C, e a maior, obtida no verão, em 08/02/2014 (35,8°C) com Tar de 32°C. Os resultados do mapeamento da FCV, NDMI e emissividade, em fevereiro, julho, agosto e outubro de 2014, refletem a escassez de chuvas no ano de 2014, que foi um dos anos mais secos dos últimos 30 anos. Os resultados de albedo, por sua vez, espelham a heterogeneidade do tecido urbano.

A Figura 4.23 apresenta a distribuição do calor antropogênico (Qf), calculado a partir dos dados de densidade demográfica (habitante/Km²) e consumo de energia por habitante na macrozona urbana (MU) do município de São José dos Campos (Equação 3.13). A quantidade de calor antropogênico gerado na MU varia entre 0 e 2,80 Watts/m².ano, fazendo-se mais intensa nas áreas densamente povoadas e ocupadas por edificações. Os resultados foram estimados com base no censo de 2010, compilados no mapa de setores sócio econômicos, disponibilizados na documentação do plano diretor (PMSJC, [s.d.]).

Figura 4.23 - Calor antropogênico na macrozona urbana do município de SJC.

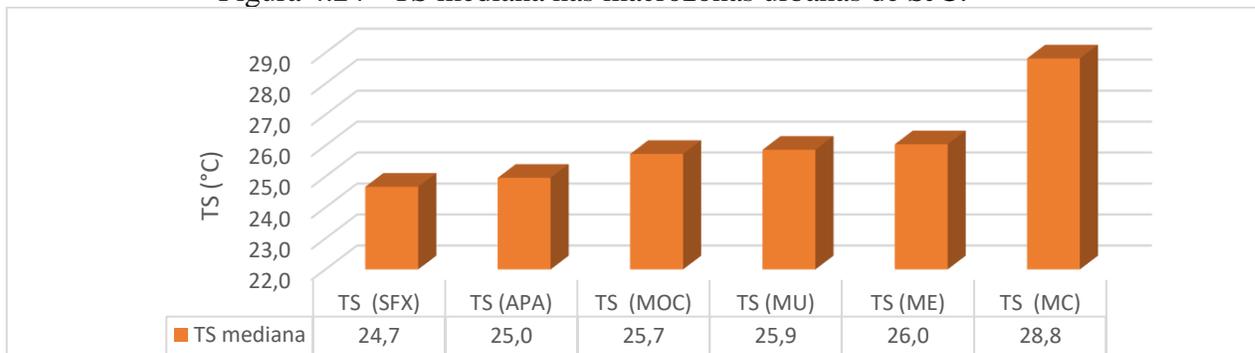


Fonte: Adaptado de PMSJC (2019).

As Figura 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam o resumo dos valores medianos de cada variável mapeada, em todas as datas analisadas, em cada macrozona urbana do município de SJC. As medianas dos conjuntos de dados foram utilizadas, para sintetizar os

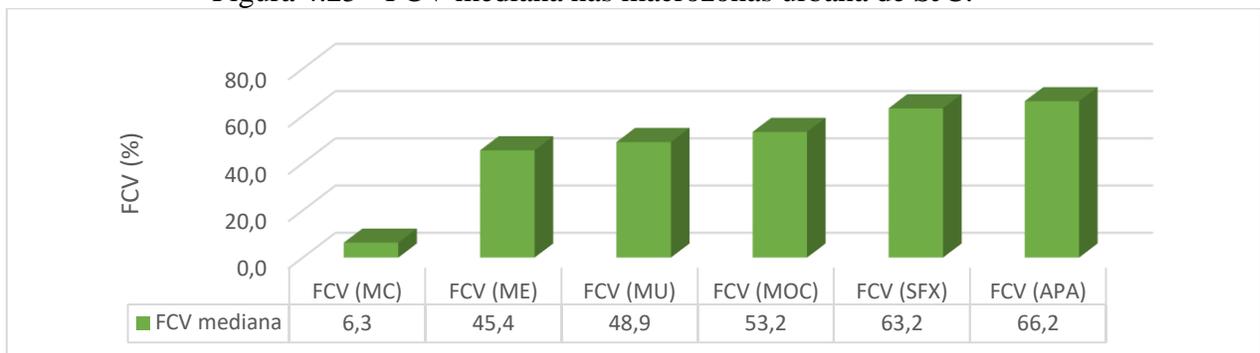
resultados e minimizar o impacto dos valores discrepantes, ou outliers, na representatividade das informações.

Figura 4.24 - TS mediana nas macrozonas urbanas de SJC.



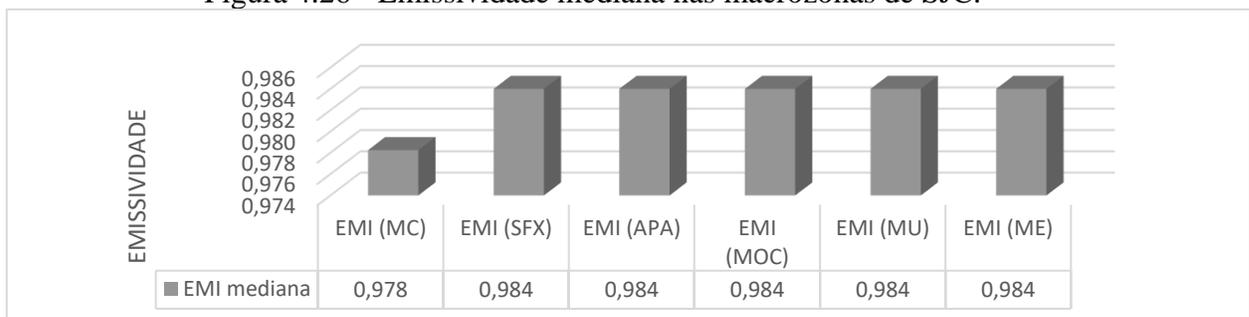
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.25 - FCV mediana nas macrozonas urbana de SJC.



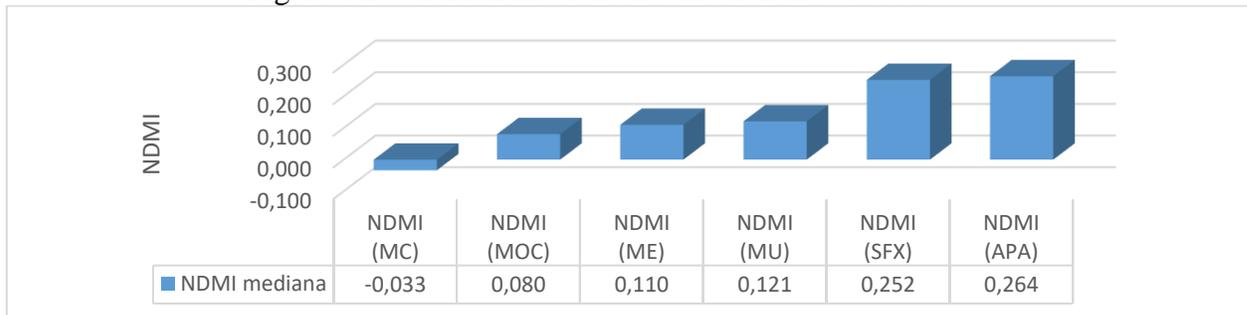
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.26 - Emissividade mediana nas macrozonas de SJC.



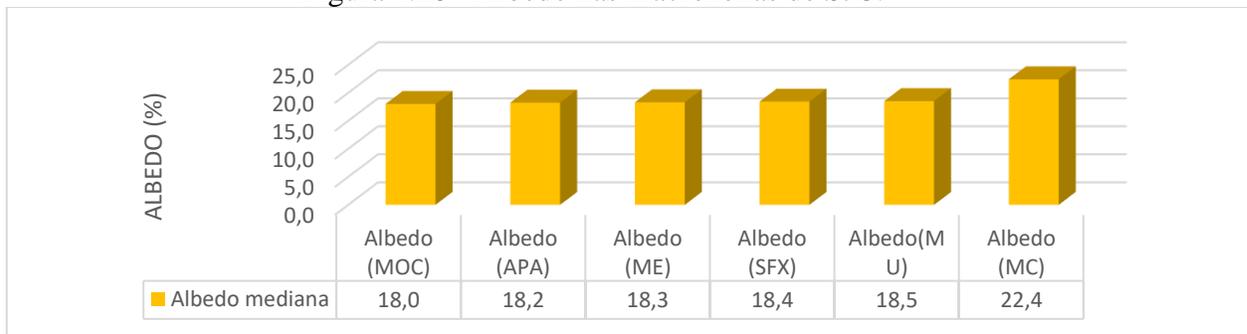
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.27 - NDMI mediana nas macrozonas de SJC.



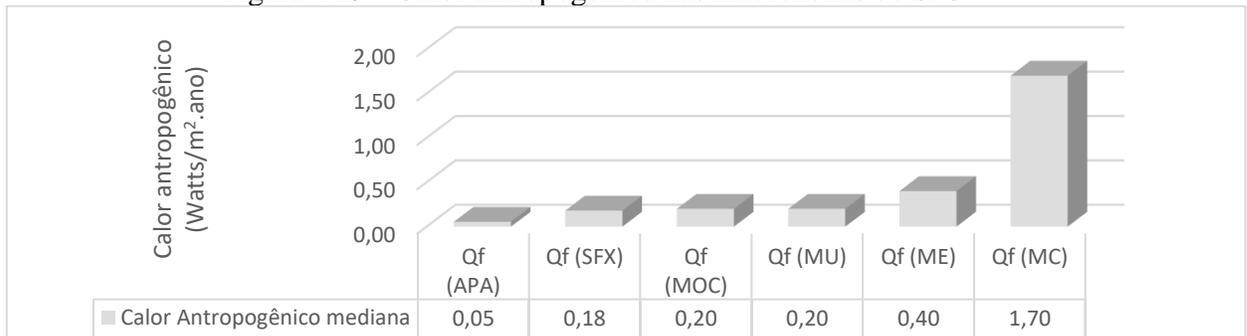
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.28 - Albedo nas macrozonas de SJC.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.29 - Calor antropogênico nas macrozonas de SJC



Fonte: Produção do autor.

A macrozona de consolidação urbana (MC), onde a área urbana está plenamente consolidada, foi a que apresentou a maior TS mediana (28,8°C), enquanto que a macrozona urbana do distrito de São Francisco Xavier (SFX) a menor (24,67°C), seguida pela área de proteção ambiental (APA) dentro da macrozona urbana (24,96°C).

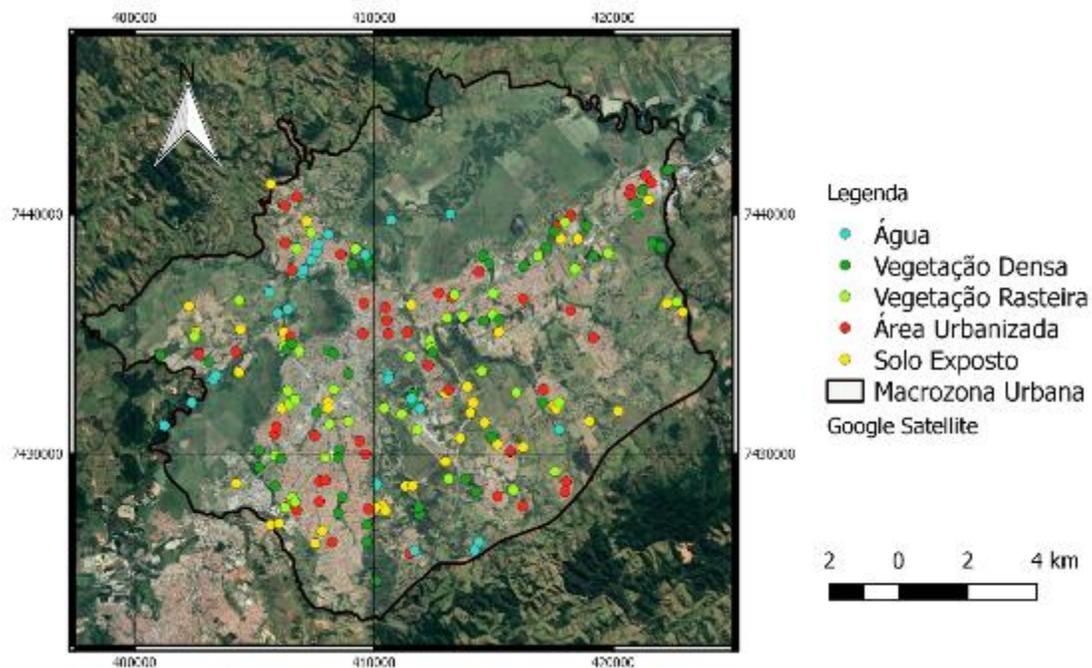
A macrozona de consolidação urbana (MC), onde o uso urbano é predominante, e concentram-se a maior parte das edificações do município, apresentou o menor valor de FCV, emissividade e NDMI. Os valores de albedo e calor antropogênico na MC, por sua vez, são

superiores aos aferidos para áreas menos urbanizadas. O maior albedo é resultado da composição das superfícies urbanas, compostas por edificações e pavimentos, que refletem mais radiação solar no intervalo visível do que as áreas verdes, onde a vegetação absorve parte da radiação solar visível, o que justifica o maior albedo. O maior calor antropogênico é resultado da maior densidade demográfica na MC, que concentra o maior número de edificações.

4.1 Verificação dos resultados

Os tipos de cobertura do solo selecionados para análise na macrozona de consolidação urbana (MU) foram: vegetação densa, grama ou pasto, água, solo exposto e área construída ou urbanizada (ZCL3). A imagem da Figura 4.30, indica a localização das amostras, selecionadas na macrozona urbana do município (MU), para representar os diferentes tipos de cobertura do solo. A seleção das amostras e as estimativas dos parâmetros representativos de cada variável, foram feitas com base nas imagens de Janeiro de 2019. Para cada um dos cinco novos conjuntos, a mediana foi calculada, e utilizada como referência, para comparação com outras bases de dados (Tabela 4.1).

Figura 4.30 - Amostras selecionadas.



Fonte: Produção do autor.

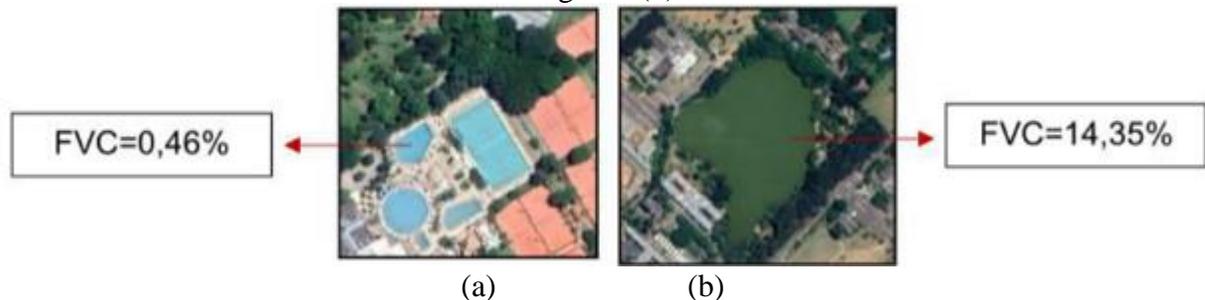
Tabela 4.1 - Valores medianos de características espectrais estimados nesta pesquisa e valores obtidos na literatura.

COBERTURA DO SOLO	FCV (%)	NDMI	ALBEDO		EMISSIVIDADE	
	Estimado	Estimado	Estimado	Fonte: (STEWART; OKE, 2012)	Estimado	Fonte: (JIN et al., 2015)
ÁREA URBANA	1,06	-0,16	0,24	0,10 a 0,35	0,973	0,964
SOLO EXPOSTO	3,09	-0,03	0,22	0,20 a 0,35	0,982	0,964
GRAMA E PASTO	45,62	0,22	0,18	0,15 a 0,30	0,984	0,984
ÁGUA	16,25	0,43	0,09	0,02 a 0,10	0,989	0,991
FLORESTA	78,17	0,42	0,13	0,10 a 0,20	0,984	0,984

Fonte: Produção da autor.

Os valores de FCV obtidos para vegetação densa (78,14%), grama ou pasto (45,62%), áreas construídas (1,06%) e solo exposto (3,09%) são compatíveis com o esperado para o tipo de cobertura em análise. Os valores de FCV (16,25%) obtidos para amostras de água, indicam a presença de matéria orgânica, típica de áreas naturalmente alagadas, como rios e lagos, enquanto que em áreas onde observa-se a presença de água tratada, como a água de piscinas, obtém-se um valor abaixo de 1%, indicando a ausência de matéria orgânica (Figura 4.31).

Figura 4.31 - Exemplos de FCV para áreas com água tratada artificialmente (a) e áreas naturalmente alagadas (b) em SJC.



Fonte: Produção do autor.

Os valores positivos de NDMI, obtidos para vegetação densa (0,451), grama ou pasto (0,227) e água (0,433) configuram a presença de água ou umidade na superfície. Os valores negativos, obtidos para solo exposto ou áreas em processo de urbanização (-0,036) e áreas construídas (-0,161) indicam ausência.

Os valores de emissividade e albedo, obtidos para os tipos de cobertura avaliados, com exceção da categoria solo exposto, são compatíveis com os obtidos em pesquisas anteriores

(JIN et al., 2015; STEWART; OKE, 2012; WATERS et al., 2002). A emissividade do solo exposto (0,982) na área de estudo (Figura 4.32), superior ao obtido em outras pesquisas (0,964)(JIN et al., 2015) (Tabela 4.1), reflete as características do solo na área de estudos: o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), típico de regiões tropicais, que é caracterizado por diferentes níveis de Óxido de Ferro e matéria orgânica (FERNANDES et al., 2004).

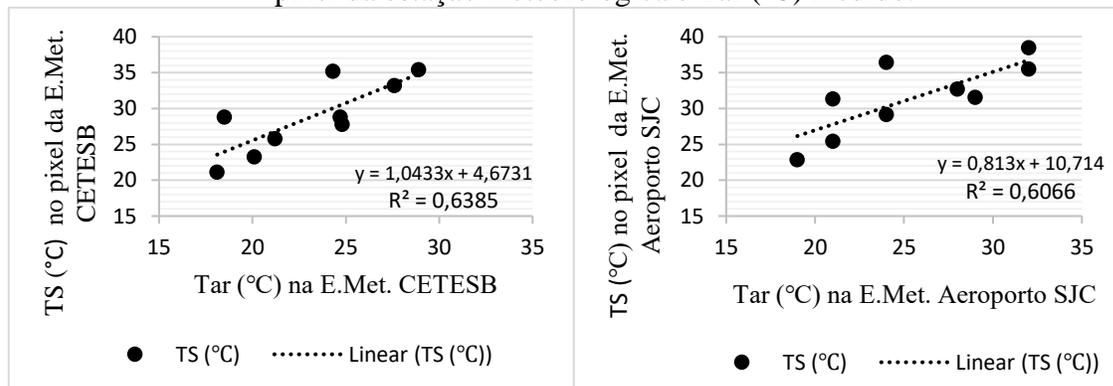
Figura 4.32 - Exemplos de amostras de solo exposto em SJG.



Fonte: Produção do autor.

A verificação dos valores obtidos para a temperatura das superfícies (TS) foi feita utilizando-se um diagrama de dispersão para comparar os valores de temperatura do ar (Tar), medidos nas estações meteorológicas da CETESB (Figura 4.33a) e do aeroporto (Figura 4.33b), com os valores de TS estimados para o pixel onde a estação está locada. Os resultados do coeficiente de determinação (R^2) apontam que aproximadamente 60% da variabilidade da TS está relacionada à variação da Tar (Figura 4.33 a e b). Vale a pena lembrar que a variação da TS, embora influenciada pela Tar, também está relacionada às características espectrais da superfícies e condições climáticas, que influenciam os fluxos de calor e determinam o balanço de energia nas superfícies, conforme descrito na equação 2.1.

Figura 4.33 - Diagrama de dispersão: temperatura da superfície (TS em °C) estimada no pixel da estação meteorológica e Tar (°C) medido.



(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

4.2 Análises de correlação

As análises de correlação foram realizadas para a macrozona de consolidação urbana (MC), utilizando as 9 imagens selecionadas nesta pesquisa. Os coeficientes de correlação médios, obtidos entre TS e FVC, emissividade e NDMI, foram -0,76, -0,78 e -0,73 respectivamente, indicando correlação negativa entre TS e FVC, ϵ e NDMI. O coeficiente de correlação obtido entre TS e A foi de 0,57, indicando uma fraca correlação positiva entre TS e A. Já o coeficiente de correlação de *Spearman* entre TS e calor antropogênico (Q_f), com valor médio de 0,21, não indicou correlação entre essas variáveis (Tabela 4.2).

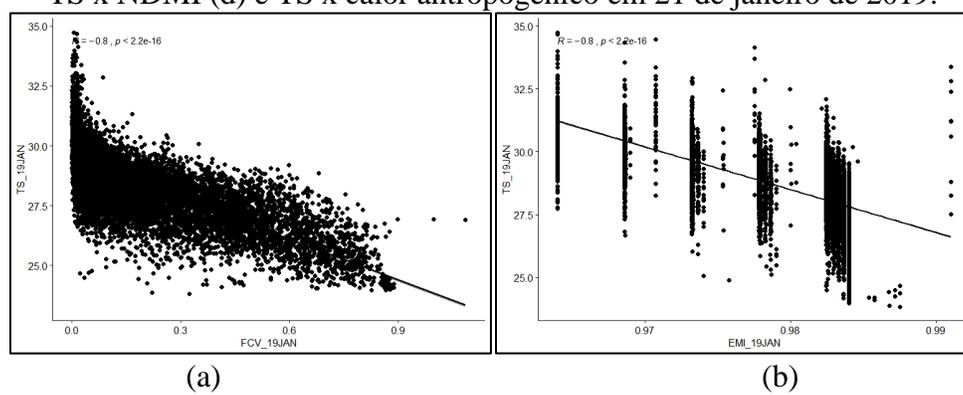
Tabela 4.2 - Coeficientes de correlação de *Spearman* (ρ_s) entre TS, características espectrais e calor antropogênico.

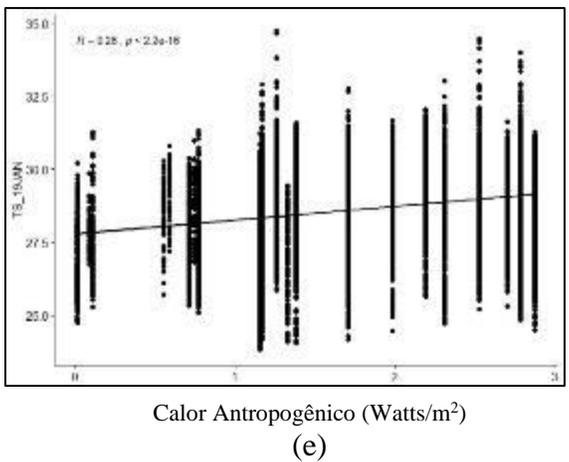
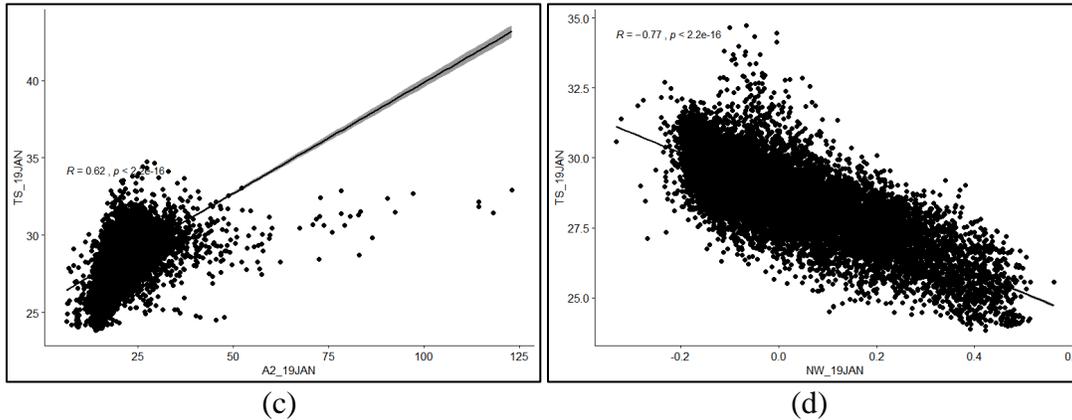
TS/DATA	ALBEDO	FVC	EMISSIVITY	NDMI	CALOR ANTROPOGÊNICO
TS_14FEB	0,55	-0,74	-0,75	-0,71	0,23
TS_14MAR	0,49	-0,74	-0,75	-0,73	0,27
TS_14MAY	0,64	-0,90	-0,96	-0,79	0,19
TS_14JUL	0,67	-0,91	-0,96	-0,78	0,16
TS_14AUG	0,55	-0,62	-0,64	-0,65	0,23
TS_14OCT	0,41	-0,57	-0,58	-0,58	0,08
TS_14DEC	0,58	-0,77	-0,77	-0,75	0,22
TS_15JAN	0,62	-0,83	0,82	-0,82	0,27
TS_19JAN	0,62	-0,80	-0,80	-0,77	0,26
Correlação Média	0,57	-0,76	-0,78	-0,73	0,21

Fonte: Produção da autor.

Os gráficos da Figura 4.34 a, b, c, d e e, apresentam os diagramas de dispersão de pontos, para ilustrar a relação entre as variáveis espectrais, calor antropogênico e TS, em 10 janeiro de 2019.

Figura 4.34 - Gráficos de dispersão: TS x FVC (a), TS x emissividade (b), TS x albedo (c), TS x NDMI (d) e TS x calor antropogênico em 21 de janeiro de 2019.





Fonte: Produção do autor.

Os valores de correlação negativos obtidos entre TS, ϵ , FCV e NDMI, permitem inferir, que valores baixos de TS estão correlacionados com altos valores de ϵ , FCV e NDMI. Esses resultados indicam que a capacidade de resfriamento de uma superfície, caracterizada por sua temperatura, está correlacionada com seu conteúdo de água e vegetação. Os valores de correlação obtidos entre TS e A, porém mostram-se inconclusivos, e os resultados de correção entre TS e o calor antropogênico, não permitem inferir correlação entre estas variáveis.

As análises dos coeficientes de correlação obtidos entre as variáveis espectrais (Tabela 4.3) apontaram uma forte correlação positiva entre a FCV e NDMI, com coeficientes de correlação acima de 0,85 ($p_s > 0,85$) em todas as datas analisadas, bem como a fraca correlação entre o NDMI e emissividade, com correlação positiva acima de 0,60 ($p_s > 0,60$). Já a correlação entre as demais variáveis não se mostrou expressiva, com valores abaixo de 0,60.

Tabela 4.3 - Coeficientes de correlação de *Spearman* entre as variáveis espectrais na macrozona de consolidação urbana (MC).

IMAGEM	Emissividade x variáveis espectrais				FCV x variáveis espectrais			NDMI x variáveis espectrais	
	VAR.	FCV	NDMI	ALBEDO	VAR.	NDMI	ALBEDO	VAR.	ALBEDO
FEV_2014	EMI	0,55	0,61	-0,59	FCV	0,91	-0,56	NDMI	-0,55
MAR_2014	EMI	0,58	0,62	-0,43	FCV	0,91	-0,41	NDMI	-0,38
MAI_2014	EMI	0,57	0,60	-0,55	FCV	0,91	-0,54	NDMI	-0,57
JUL_2014	EMI	0,62	0,61	-0,62	FCV	0,89	-0,71	NDMI	-0,86
AGO_2014	EMI	0,63	0,62	-0,52	FCV	0,85	-0,52	NDMI	-0,51
OUT_2014	EMI	0,62	0,66	-0,60	FCV	0,90	-0,60	NDMI	-0,56
DEZ_2014	EMI	0,59	0,70	-0,58	FCV	0,92	-0,52	NDMI	-0,56
JAN_2015	EMI	0,58	0,64	-0,63	FCV	0,93	-0,59	NDMI	-0,62
JAN_2019	EMI	0,54	0,64	-0,56	FCV	0,93	-0,49	NDMI	-0,52
TODAS	CORR. MÉDIA	0,59	0,63	-0,56	CORR. MÉDIA	0,91	-0,55	CORR. MÉDIA	-0,57

Fonte: Produção do autor.

Os coeficientes de correlação, obtidos entre o calor antropogênico (Q_f) e variáveis espectrais (Tabela 4.4) não apontaram correlação entre essas variáveis, o que pode ser concluído com base nos valores médios obtidos, abaixo de 0,19.

Tabela 4.4 - Coeficientes de correlação de *Spearman* entre calor antropogênico (Q_f) e variáveis espectrais na macrozona de consolidação (MC) de São José dos Campos.

IMAGEM	Calor Antropogênico x variáveis espectrais				
	VAR.	FCV	NDMI	ALBEDO	EMISSIVIDADE
FEV_2014	Q_f	-0,18	-0,18	0,17	-0,19
MAR_2014	Q_f	-0,20	-0,20	0,12	-0,20
MAI_2014	Q_f	-0,18	-0,19	0,14	-0,19
JUL_2014	Q_f	-0,17	-0,18	0,16	-0,19
AGO_2014	Q_f	-0,17	-0,19	0,14	-0,19
OUT_2014	Q_f	-0,18	-0,19	0,15	-0,18
DEZ_2014	Q_f	-0,19	-0,22	0,16	-0,20
JAN_2015	Q_f	-0,19	-0,20	0,19	-0,19
JAN_2019	Q_f	-0,17	-0,18	0,17	-0,17
TODAS	CORR. MÉDIA	-0,18	-0,19	0,16	-0,19

Fonte: Produção do autor.

4.3 Análises de autocorrelação espacial

As análises de autocorreção espacial foram realizadas na macrozona de consolidação urbana (MC), utilizando-se as imagens de 2014 e 2015. Nesta etapa, o índice de *Moran (I)* e o índice local de associação espacial (LISA) foram calculados utilizando-se os dados de temperatura das superfícies nas oito imagens selecionadas, com o objetivo de identificar a ocorrência da dependência espacial da TS, bem como identificar padrões da paisagem associados.

Os resultados das análises de autocorrelação espacial para uma mesma data indicaram a alta dependência espacial de TS, com valores acima de 0,80. Já as análises voltadas para aferir a dependência espacial de TS em diferentes datas, mostraram índices menos expressivos, mas que indicam a dependência espacial de TS, apesar da variabilidade climática sazonal e das mudanças inerentes à dinâmica urbana (Tabela 4.5).

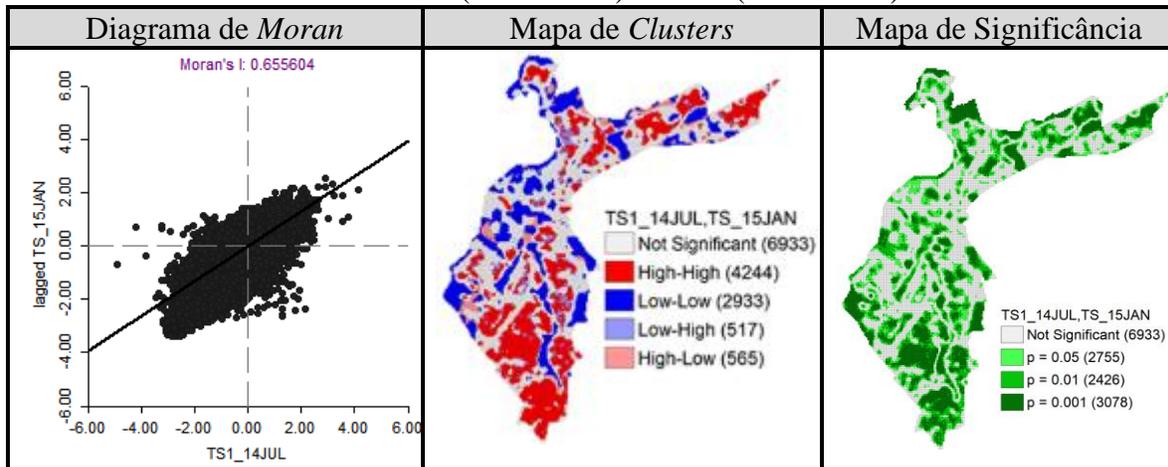
Tabela 4.5 - Índice global de *Moran (I)* entre TS em diferentes datas

DATA	14FEV	14MAR	14MAI	14JUL	14AGO	14OUT	14DEZ	15JAN	19JAN
14FEV	0,869	0,819	0,786	0,751	0,766	0,757	0,74	0,781	0,755
14MAR	0,819	0,872	0,77	0,709	0,728	0,729	0,77	0,812	0,811
14MAIO	0,786	0,77	0,846	0,779	0,781	0,754	0,697	0,723	0,705
14JUL	0,751	0,709	0,779	0,829	0,821	0,754	0,612	0,655	0,627
14AGO	0,766	0,728	0,781	0,821	0,862	0,754	0,622	0,667	0,639
14OUT	0,757	0,729	0,754	0,754	0,754	0,839	0,633	0,658	0,654
14DEZ	0,74	0,77	0,697	0,612	0,622	0,633	0,857	0,804	0,792
15JAN	0,781	0,812	0,723	0,655	0,667	0,658	0,804	0,878	0,862

Fonte: Produção da autor.

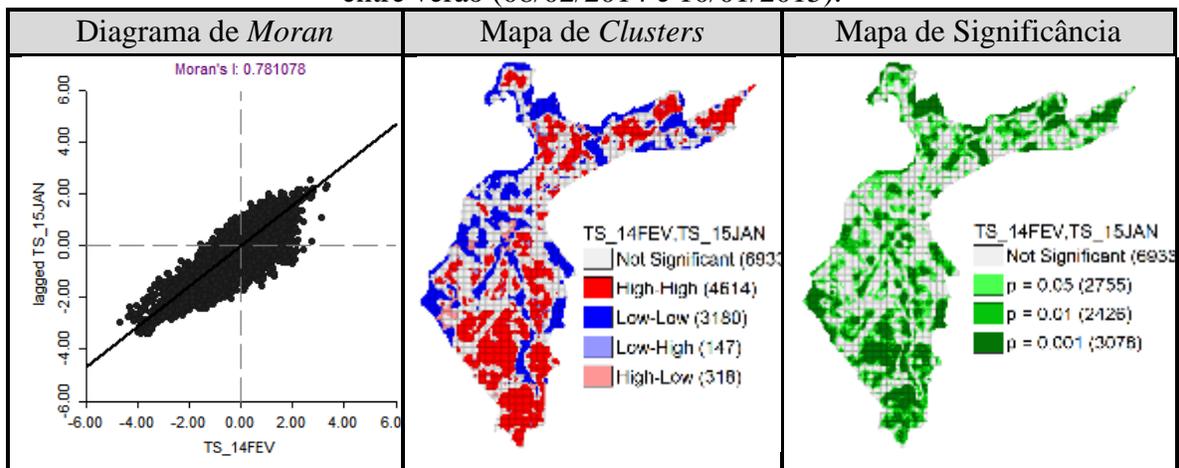
As imagens das Figura 4.35, Figura 4.36 e 4.37 apresentam um exemplo das associações espaciais obtidas pelo cálculo dos índices de autocorrelação espacial de *Moran*, que podem ser observados nos diagramas de espalhamento de *Moran*, mapas de *clusters* e mapas de significância, obtidos para diferentes situações analisadas. O índice de *Moran (I)* obtido para avaliar a dependência espacial da TS, utilizando uma imagem adquirida no inverno e outra no verão (julho/2014 e janeiro/2015) foi de 0,655; o índice obtido entre imagens adquiridas no verão (fevereiro/2014 e janeiro/2015), foi 0,781; e para uma mesma data (janeiro/2015) foi de 0,878. Na legenda dos mapas apresentados nas Figura 4.35, Figura 4.36 e 4.37, o número entre parênteses indica o número de células classificadas de acordo com o índice de autocorrelação espacial e índice de significância.

Figura 4.35 - Dependência espacial de TS na macrozona de consolidação urbana (MC) entre inverno (02/07/2014) e verão (10/01/2015)



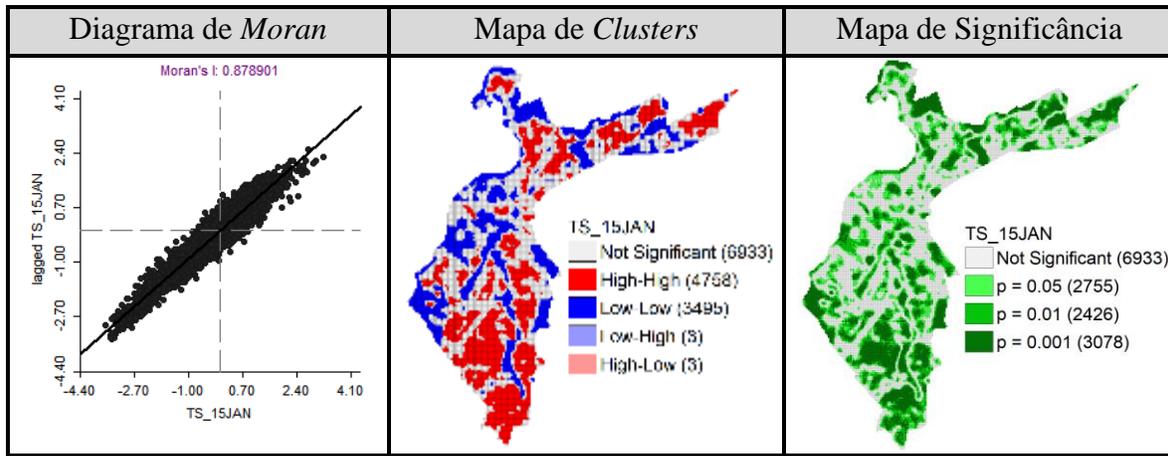
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.36 - Dependência espacial de TS na macrozona de consolidação urbana (MC) entre verão (08/02/2014 e 10/01/2015).



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.37 - Dependência espacial de TS na macrozona de consolidação urbana (MC) em 10/01/2015.

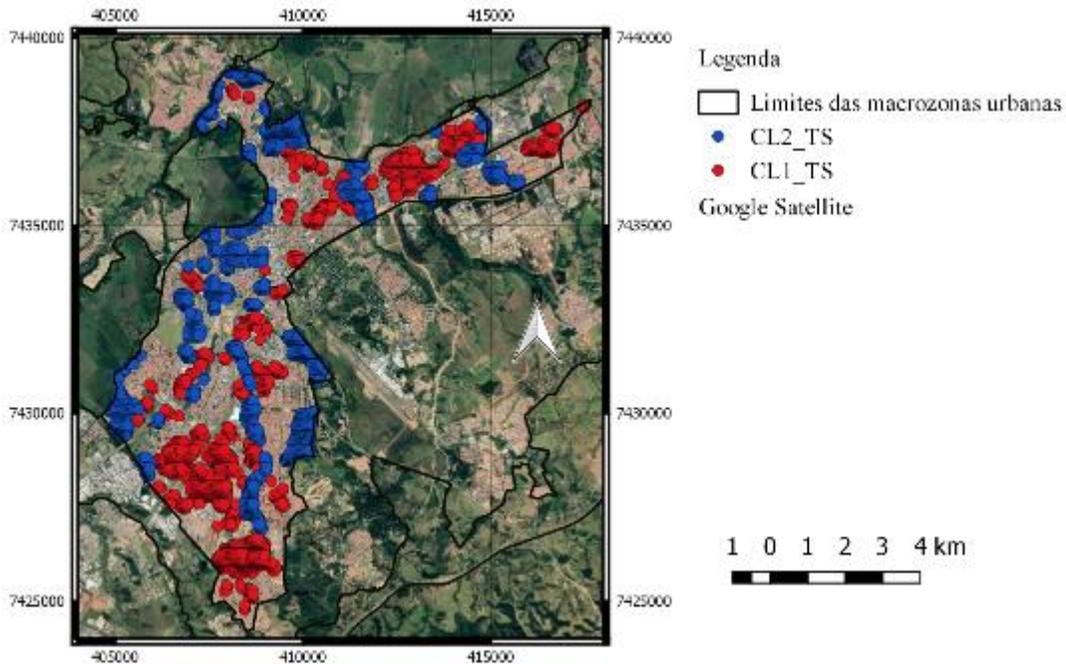


Fonte: Produção do autor.

O mapeamento do LISA da TS permitiu identificar as áreas onde altos valores de TS estão associados a altos valores de TS (alto-alto ou *high-high*), classificadas como cluster 1 (CL-1); áreas onde baixos valores de TS estão associadas a baixas TS (baixo-baixo ou *low-low*), que são classificadas como *cluster 2* (CL-2); e áreas que são consideradas outliers espaciais, onde baixas TS estão associadas a altas TS (baixo-alto ou *low-high*), classificadas como cluster 3 (CL-3) e áreas onde altas TS estão associadas a baixas TS (baixo-alto ou *high-low*), classificadas como cluster 4 (CL-4).

A seleção das amostras ou células com a mesma classificação de *clusters* de TS, utilizando-se os dados de 2014 e 2015, permitiu identificar áreas que tiveram a mesma classificação de cluster, sob diferentes condições climáticas. A identificação de áreas com comportamento térmico similar foi feita através da ferramenta de seleção do QGis, onde as áreas classificadas como CL1, ou “pontos quentes”, onde as altas TS estão associadas no espaço, e áreas classificadas como CL2, ou “sumidouros de calor” onde baixas TS estão associadas no espaço, foram compiladas para a criação de dois novos conjuntos de dados denominados CL1_TS e CL2_TS gerando um novo mapa (Figura 4.38). Neste processo 1530 células foram classificadas como CL1_TS e 1560 classificadas como CL2_TS.

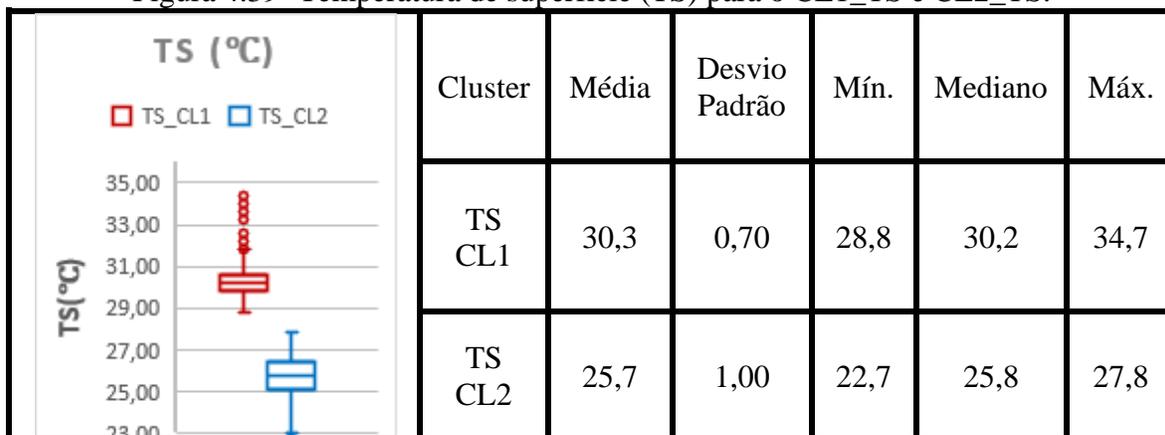
Figura 4.38 - Pontos quentes (CL1_TS) e sumidouros de calor (CL2_TS) em SJC.



Fonte: Produção do autor.

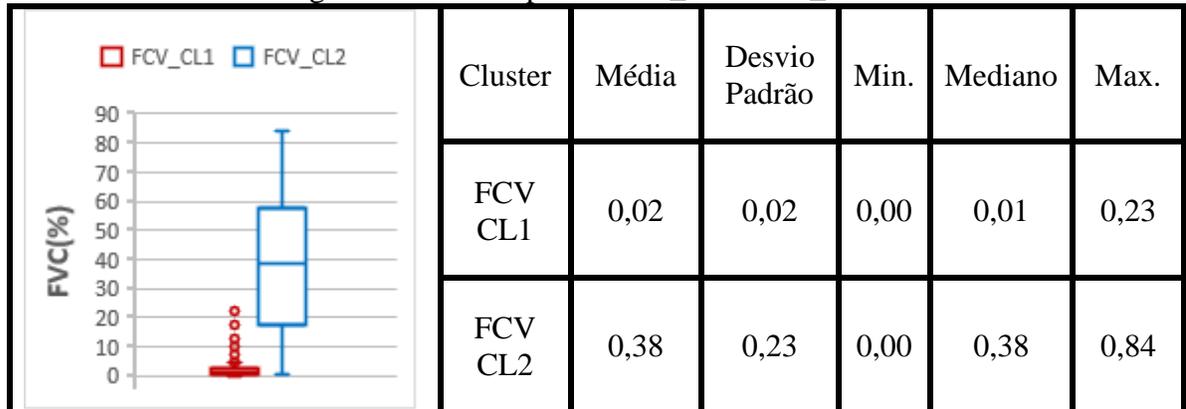
A criação e o mapeamento dos *clusters* de TS, baseado no índice LISA, permitiu extrair informações sobre as características espectrais dos dois novos conjuntos de dados criados: CL1_TS e CL2_TS (Figura 4.39 a Figura 4.44) e identificar os padrões da paisagem a elas associados, utilizando-se o sistema de classificação das ZCLs (Figura 4.45). A identificação das ZCLs associadas aos CL1_TS e CL2_TS, foi feita com base na observação das características construtivas utilizando-se as imagens disponíveis no Google Earth (“Google Earth”, 2019).

Figura 4.39 - Temperatura de superfície (TS) para o CL1_TS e CL2_TS.



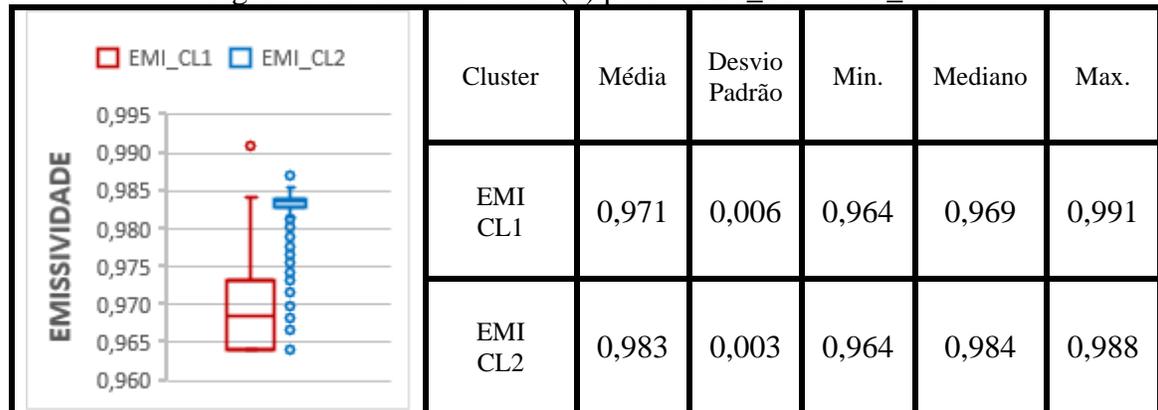
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.40 - FCV para o CL1_TS e CL2_TS.



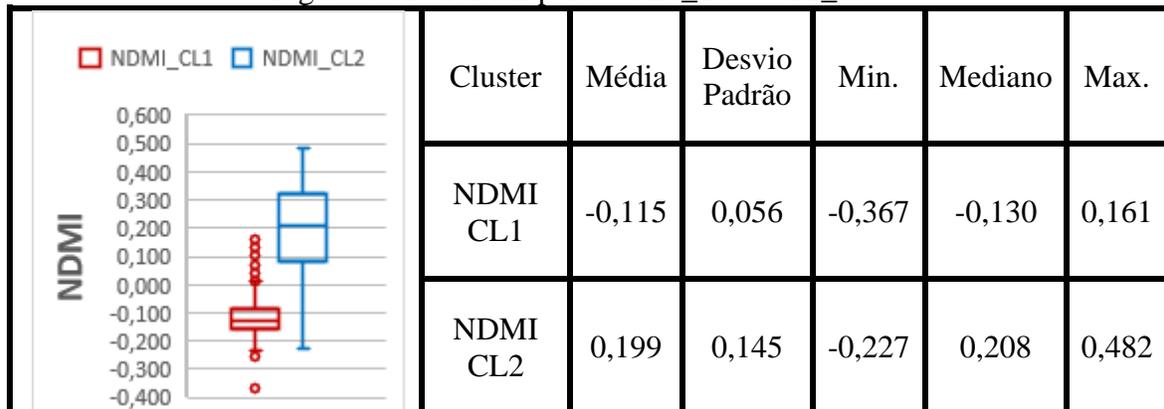
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.41 - Emissividade (ϵ) para o CL1_TS e CL2_TS.



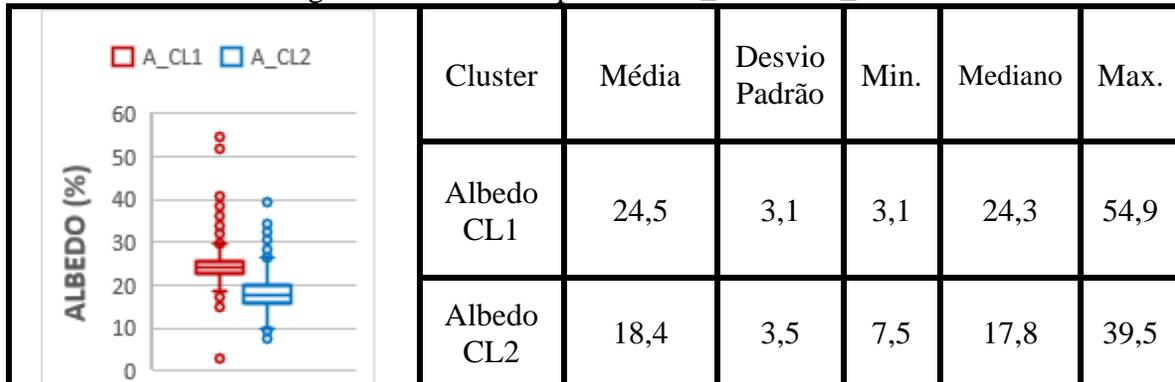
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.42 - NDMI para o CL1_TS e CL2_TS.



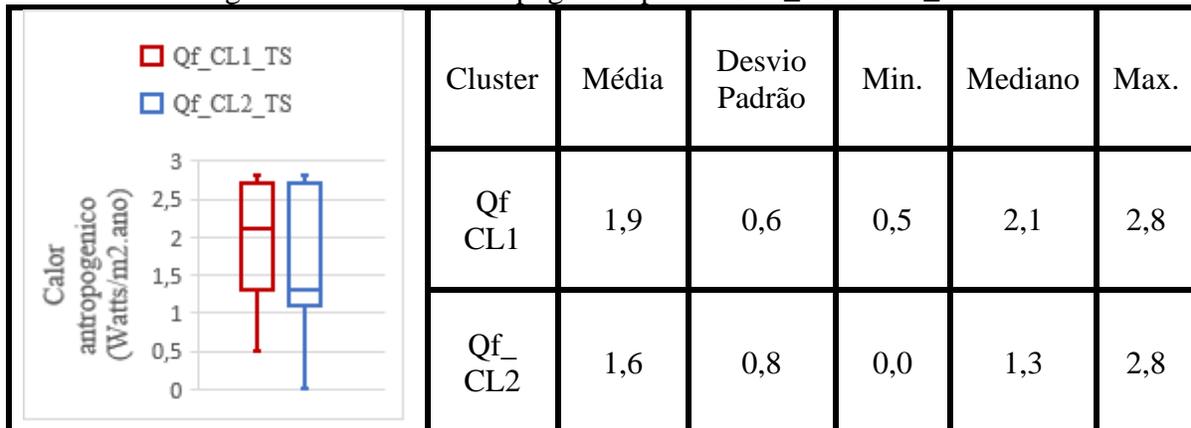
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.43 - Albedo para o CL1_TS e CL2_TS.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.44 - Calor antropogênico para o CL1_TS e CL2_TS.



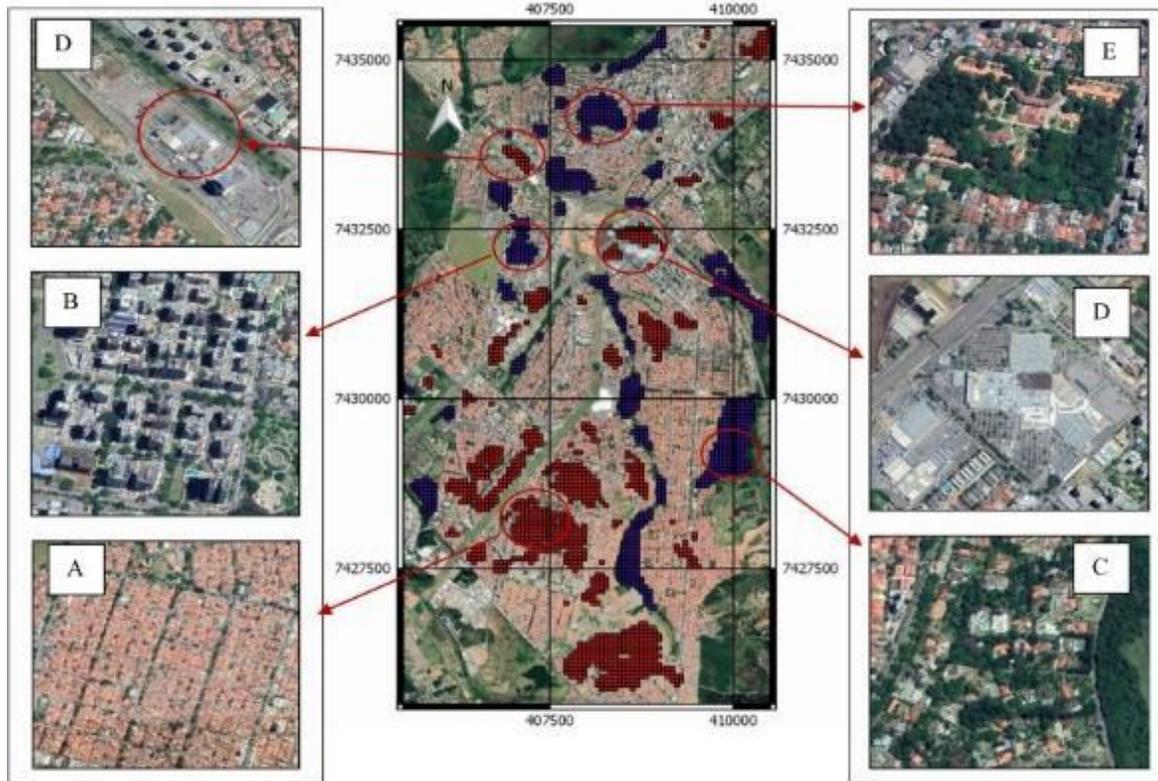
Fonte: Produção do autor.

A comparação entre os resultados dos novos conjuntos, CL1_TS e CL2_TS, mostrou que a diferença de TS entre esses *clusters* chegou a aproximadamente 12°C nos casos extremos. No CL1_TS o albedo mediano, obtido para o conjunto de dados foi 24% e a TS mediana 30°C. Estes valores foram maiores que os obtidos para o CL2_TS, com albedo mediano de 18% e TS de 26°C. Por outro lado, as áreas classificadas como CL2_TS apresentaram maiores valores de emissividade (0,984), FCV (38%) e NDMI positivo (0,20), enquanto as áreas classificadas como CL1_TS menor emissividade (0,969), FCV (1%) e NDMI negativo (-0,13). O calor antropogênico estimado para cada um dos *clusters* apontou, que no CL1_TS, o calor antropogênico mediano, de 2,1 Watts/m².ano, é mais intenso que no CL2_TS, com 1,3 Watts/m².ano.

As tipologias construtivas observadas no CL1_TS, também denominados nesta pesquisa como “pontos quentes”, classificadas de acordo com o sistema baseado em zonas climáticas locais (ZCLs) (STEWART; OKE; KRAYENHOFF, 2014) foram: ZCL8 caracterizada por ocupações esparsas, com edificações extensas de médio porte com altura entre 3 e 10 metros;

e ZCL3, caracterizada por ocupações compactas com edificações de pequeno porte com altura da entre 3 e 8 metros. No CL2_TS as tipologias construtivas observadas foram as ZCLs identificadas como: LCZ4, composta por ocupações esparsas com edificações verticais com altura maior que 25 metros, intercaladas por vegetação; ZCL6 composta por ocupações esparsas com edificações de pequeno porte com altura entre 3 e 10 metros, intercaladas por vegetação; e ZCLA composta por árvores densas (Figura 4.45).

Figura 4.45 - CL1_TS e CL2_TS áreas e classificação ZCL.



LEGENDA (Figura 4.45)

AMOSTRA	Zona Climática Local	DESCRIÇÃO
A	ZCL3	Ocupações compactas com edificações de pequeno porte (altura da edificação entre 3-8metros)
B	ZCL4	Ocupações esparsas com edificações verticais (altura da edificação >25metros) intercaladas por vegetação
C	ZCL6	Ocupações esparsas com edificações de pequeno porte (altura da edificação entre 3-8metros) intercaladas por vegetação
D	ZCL8E	Ocupações esparsas com edificações de extensas de médio porte (altura da edificação entre 3-10 metros) em áreas predominantemente impermeabilizadas
E	ZCLA	Cobertura do solo: árvores densas

Fonte: Produção do autor.

Os resultados obtidos permitiram inferir que nos “pontos quentes” (CL1_TS), o aquecimento das superfícies está diretamente relacionado com a alta capacidade da superfície absorver e reter o calor proveniente da radiação solar que sobre ela incide, não sendo observado nenhum sistema ou infraestrutura que atenua seus efeitos. Os baixos valores de FCV, NDMI e emissividade obtidos para essas áreas identificadas como “pontos quentes” (CL1_TS), confirmam os resultados obtidos em outras pesquisas (AKBARI et al., 2015), que apontam como causas do aquecimento de superfícies e aumento da intensidade das ilhas de calor urbanas, a baixa capacidade de ocorrência dos fluxos de calor latente (λE), alta capacidade de transmissão por convecção (H), condução e radiação. Estas características induzem ao aumento de Tar e conseqüentemente aumento dos riscos relacionados ao calor, desconforto térmico humano e demanda de energia para climatização artificial e refrigeração.

Ao contrário das áreas onde altas TS ocorrem, e estão associadas no espaço, as áreas consideradas “sumidouros de calor” apresentam altos valores de FCV, NDMI e emissividade, e baixo albedo. Essas áreas apresentam alta capacidade de atenuação da radiação solar que sobre elas incide. O uso da vegetação associada ao espaço urbano e áreas permeáveis promove a atenuação dos efeitos da radiação solar sobre as superfícies. Os resultados obtidos permitem inferir que os processos de atenuação, que induzem ao resfriamento das superfícies, estão associados ao sombreamento (natural ou artificial) e ocorrência de fluxos de calor latente.

4.4 Análise de *clusters*

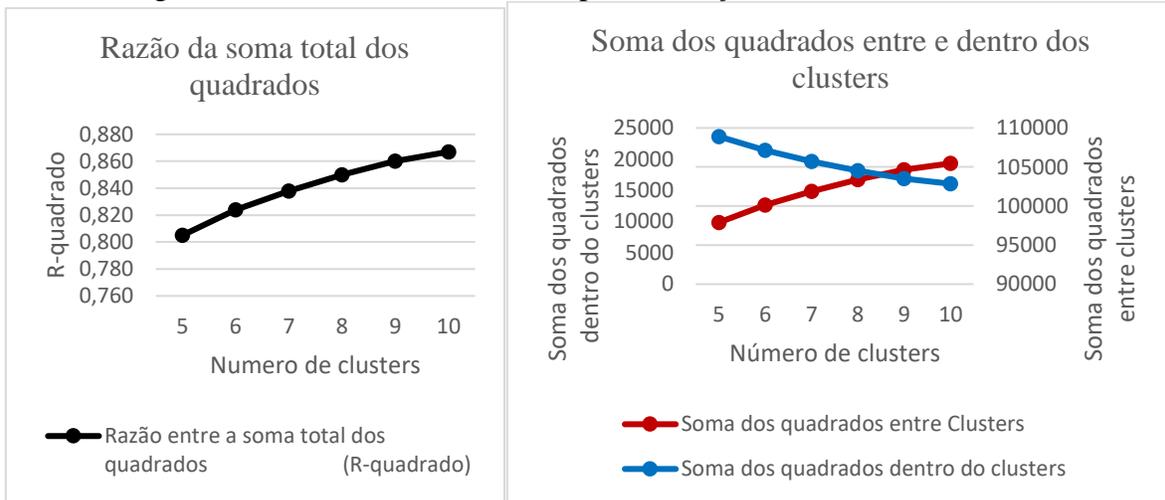
A análise de *clusters* de temperatura de superfícies (TS) foi feita a partir dos dados da macrozona de consolidação urbana (MC) e iniciou-se com a definição do número de agrupamentos ideal para realizar os estudos. Neste sentido, foram realizados testes em agrupamentos de 5 a 10 *clusters* (Figura 4.46a e b).

Os resultados apontaram que, em todos os agrupamentos testados, o coeficiente de determinação (R^2) é superior a 80% (Figura 4.46a), porém somente a partir de 9 *clusters* a soma dos quadrados entre *clusters* é relativamente superior à soma dos quadrados dentro dos *clusters* (Figura 4.46b). A soma dos quadrados entre *clusters*, aponta a variabilidade ou dissemelhança entre grupos, devendo ser a maior possível, enquanto a soma dos quadrados dentro dos *clusters*, aponta a variabilidade interna de seus componentes e deve ser a menor possível (MARÔCO, 2007).

Neste sentido, foram criados 9 novos conjuntos de dados ou *clusters* (CL1, CL2, CL3, CL4, CL5, CL6, CL7, CL8 e CL9) gerados a partir da distribuição de TS (Figura 4.47). Na sequência as áreas pertencentes a cada *cluster* foram separadas em 9 novos conjuntos de dados, o que permitiu extrair as características espectrais (Fonte: Produção do autor.

Figura 4.48 a Figura 4.52) e observar as zonas climáticas locais (ZCLs) associadas a cada *cluster*.

Figura 4.46 - Resultados dos testes para definição do número de clusters.

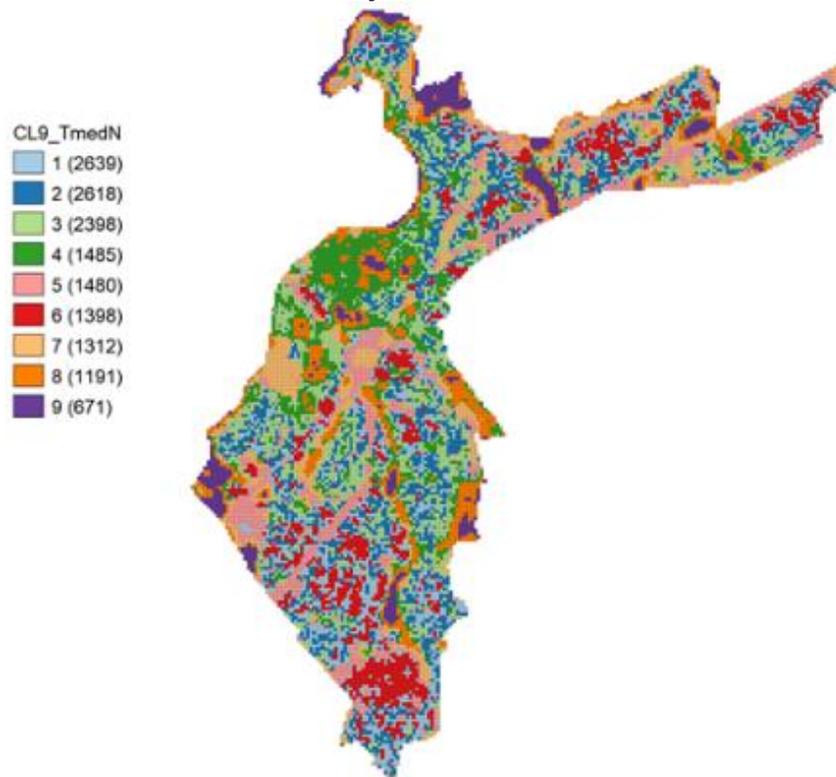


(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.47 - Mapa de *Clusters(a)* de temperatura de superfícies (TS) na macrozona de consolidação urbana de SJC.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.48 - TS (°C) para 9 clusters.

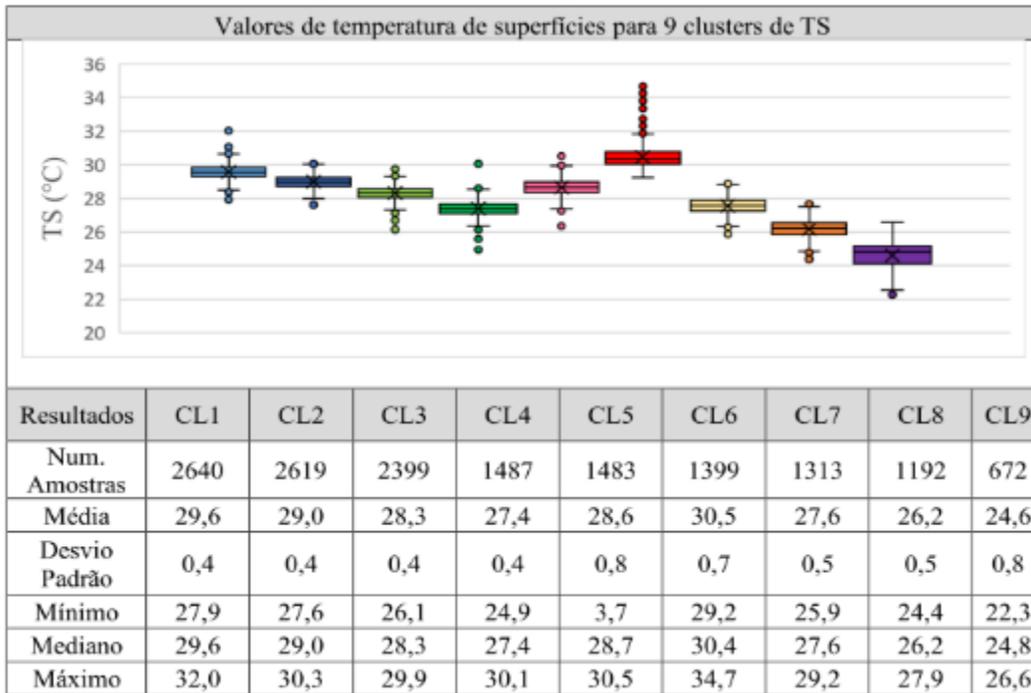
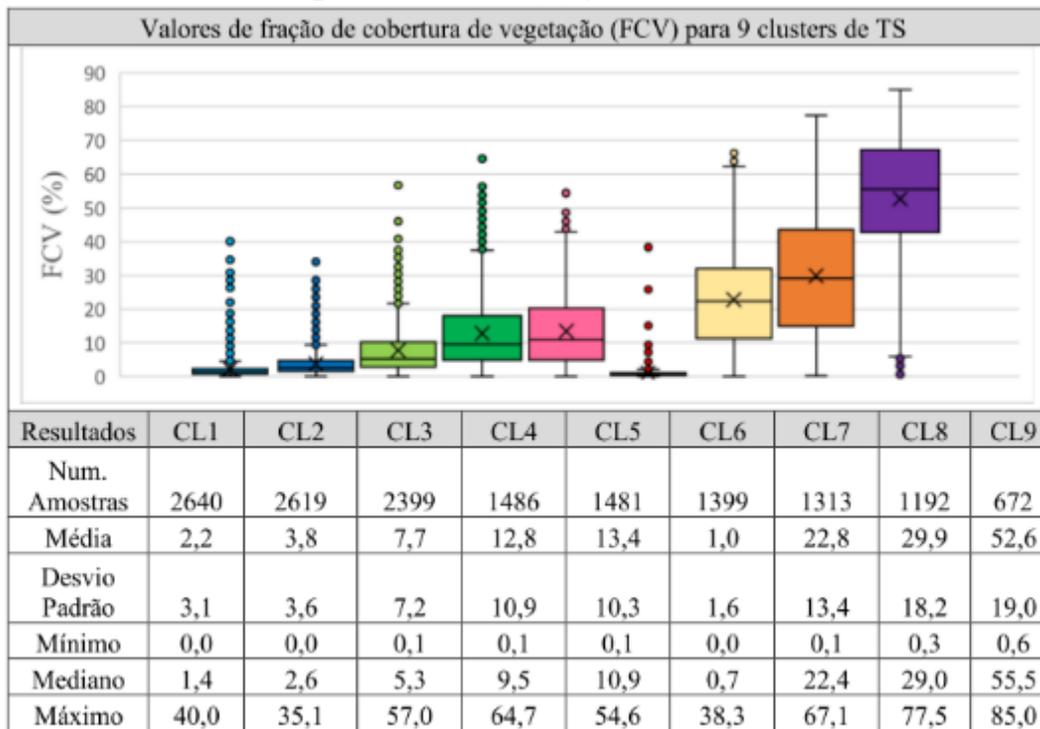


Figura 4.49 - FCV (%) para 9 clusters.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.50 - Albedo (%) para 9 clusters

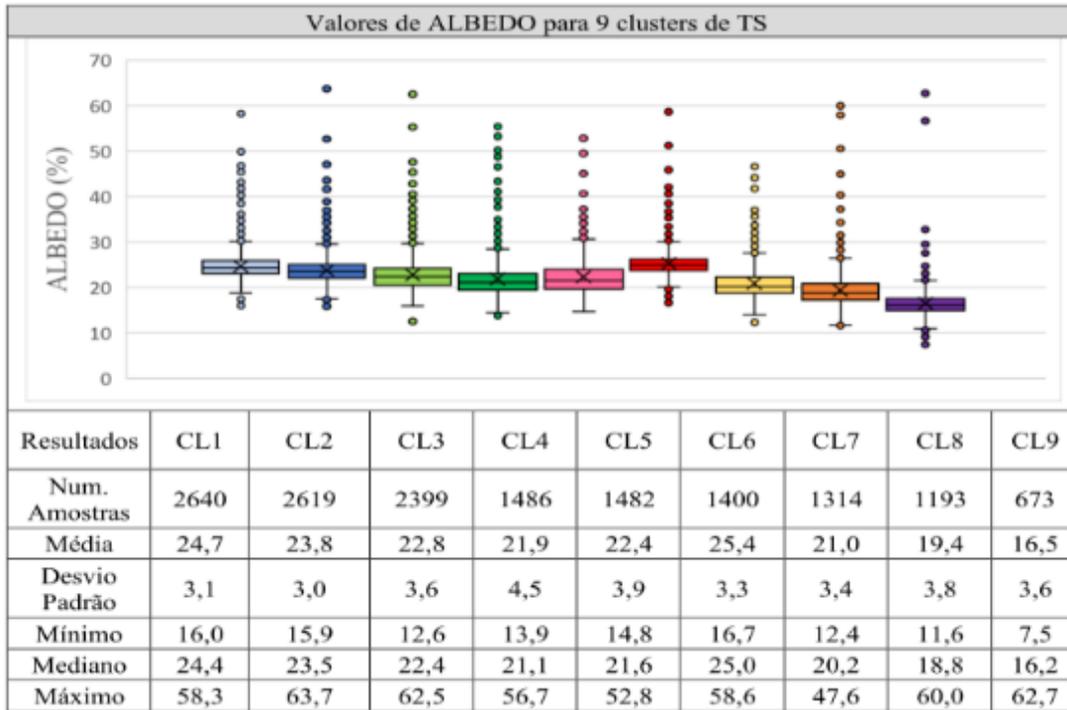
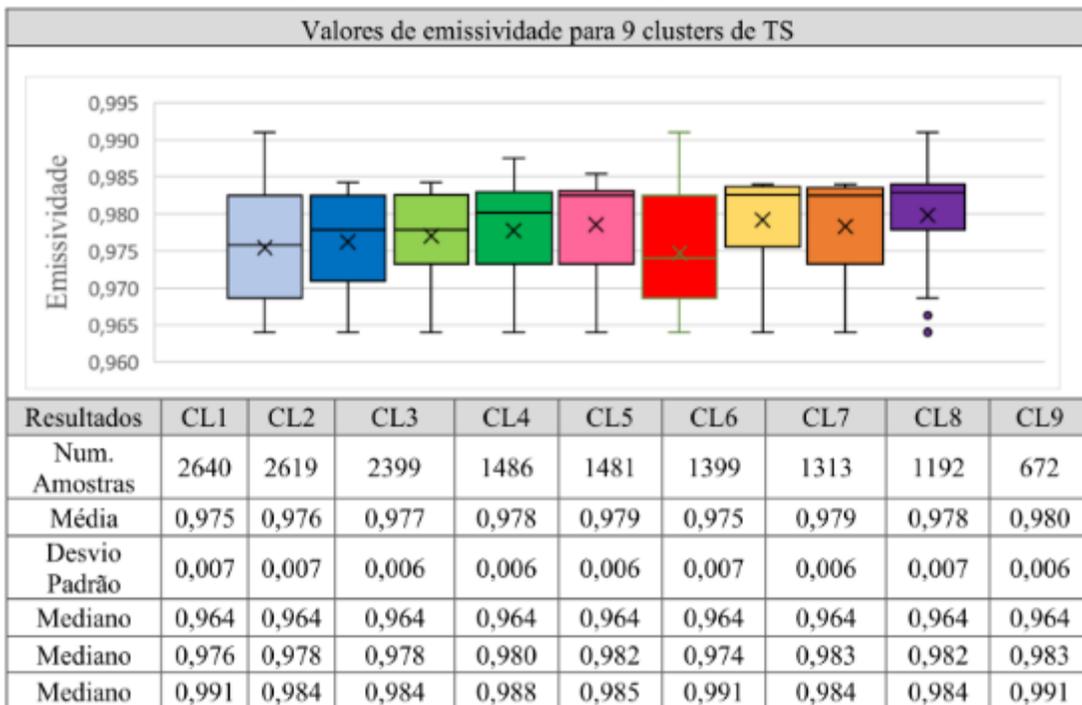


Figura 4.51 - Emissividade (ϵ) para 9 clusters



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.52 - NDMI para 9 clusters de TS.

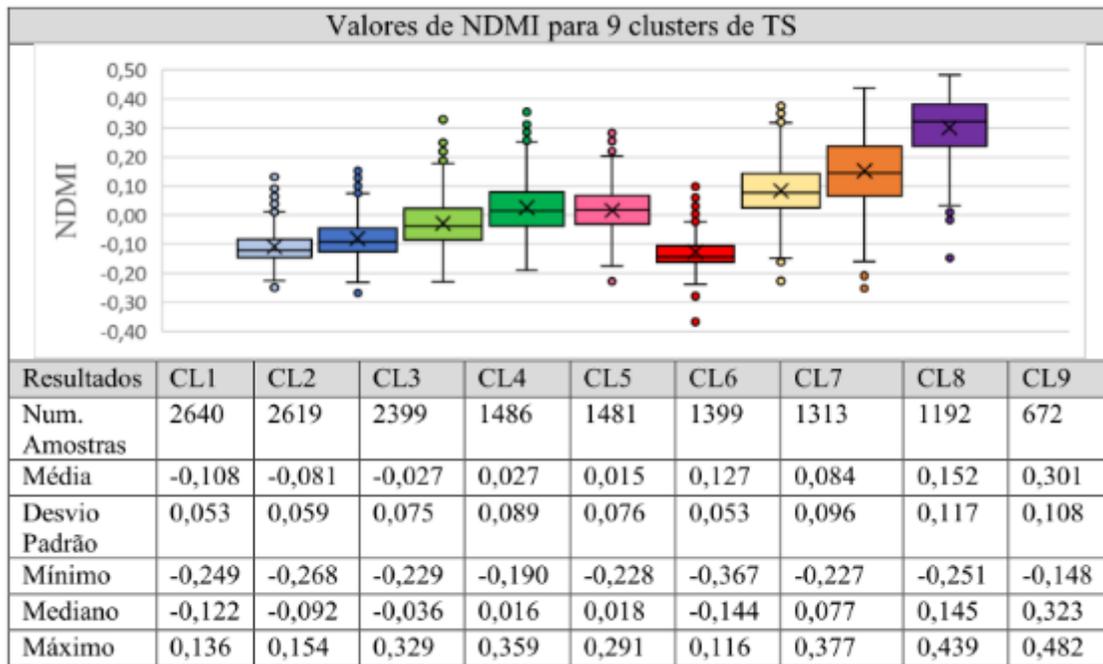
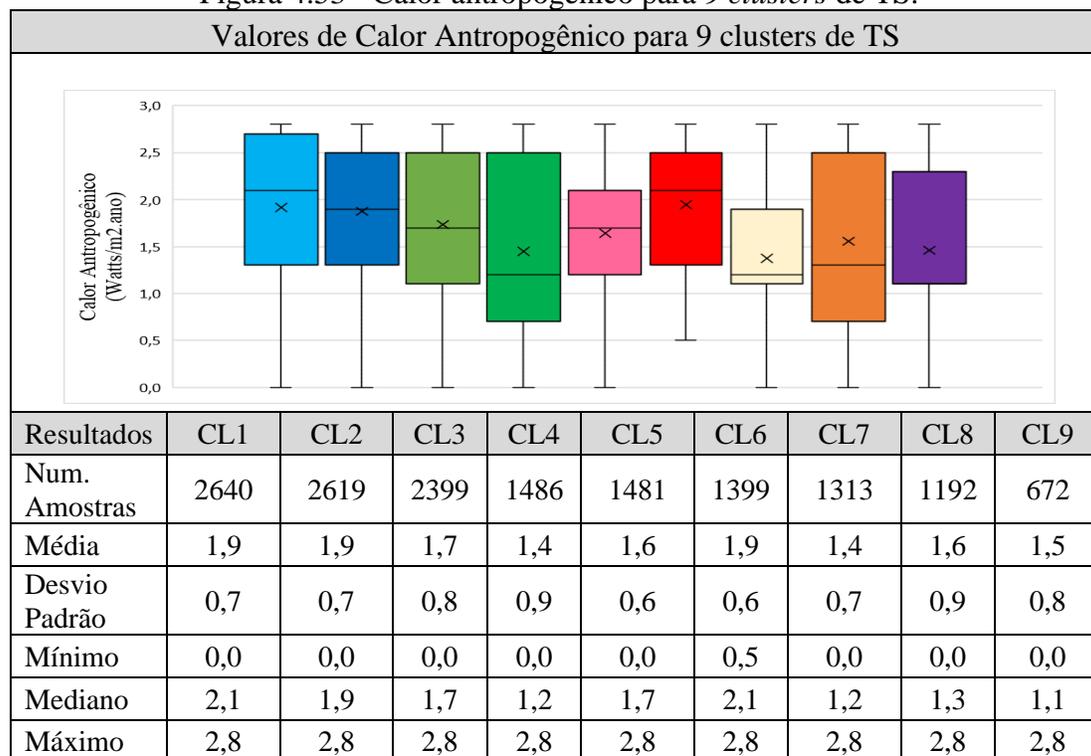


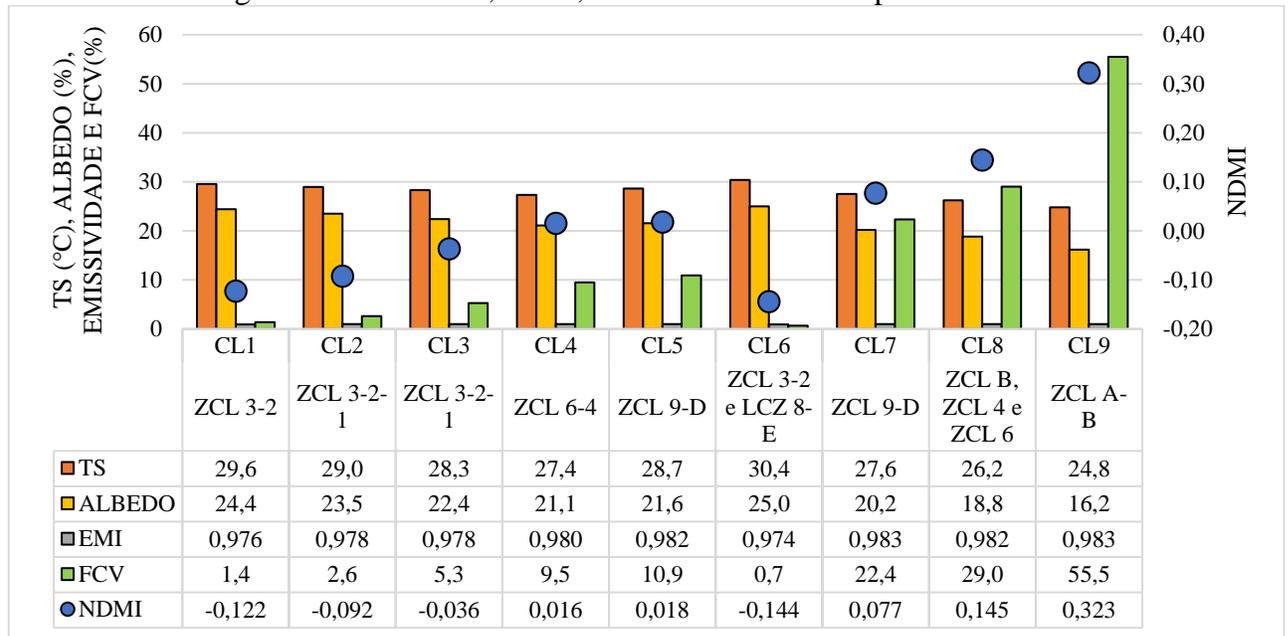
Figura 4.53 - Calor antropogênico para 9 clusters de TS.



Fonte: Produção do autor.

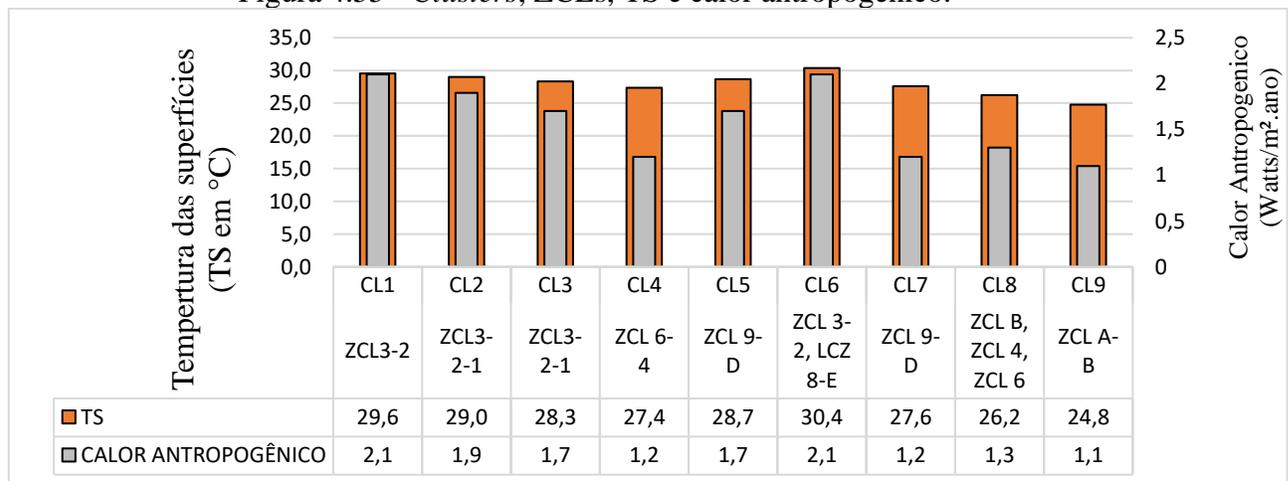
O mapeamento da área de estudos em 9 *clusters* permitiu identificar 11 ZCL presentes na macrozona de consolidação (MC): ZCL1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, A, B, D e E. A identificação das ZCLs associadas a cada cluster de TS, foi feita com base em observações nas imagens disponíveis no Google Earth. O gráfico das Figura 4.54 e Figura 4.55 resumem os valores medianos de cada variável obtido para cada *cluster*.

Figura 4.54 - *Clusters*, ZCLs, TS e características espectrais.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.55 - *Clusters*, ZCLs, TS e calor antropogênico.

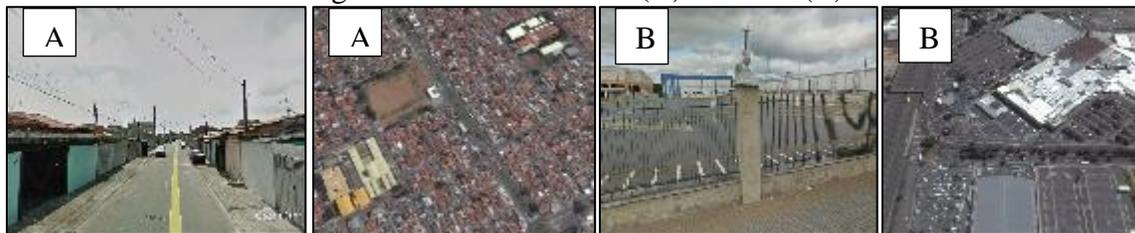


Fonte: Produção do autor.

As ZCLs identificadas nos dois *clusters* mais quentes (CL6 e CL1) foram a ZCL3, associada à ZCL2 (ZCL3₂) e ZCL8 associada à ZCLE (ZCL8_E). No CL6, o mais quente, observa-se a presença de áreas densamente ocupadas por construções horizontais de pequeno e médio porte (ZCL3₂) e áreas ocupadas por grandes centros comerciais e amplos estacionamentos, com pouca ou nenhuma vegetação (ZCL8_E) (Figura 4.56). No CL1 observa-se a presença das ZCL3₂ (Fonte: Adaptado de: Google Earth (2019).)

Figura 4.57). Estes *clusters* resultaram nos menores valores de ϵ , NDMI e FCV observados para toda a MC, e nos maiores A, resultado da ausência de árvores e sombras, com predominância de áreas construídas e impermeáveis similares aos da ZCLE, com área impermeável > 90%.

Figura 4.56 - CL6: LCZ3₂(A) e LZC8_E(B)



Fonte: Adaptado de: Google Earth (2019).

Figura 4.57 - CL1: LCZ3₂



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

As ZCL observadas nos dois cluster mais frios (CL9 e CL8) foram as ZCLA, ZCLB, ZCL4, ZCL6 e ZC9. No CL9, o cluster mais frio, observa-se a predominância de áreas densamente arborizadas (ZCLA) e áreas com árvores esparsas (ZCLB) (Figura 4.58). No CL8 observa-se a ZCL4, composta por áreas ocupadas por construções esparsas e verticais de grande porte intercaladas por vegetação e ZCL6 com construções esparsas de pequeno porte intercaladas por vegetação (Figura 4.59). O CL9 e CL8 obtiveram os maiores valores de ϵ , NDMI e FCV de todo conjunto de dados, e os menores valores de A, resultado da presença de vegetação. Nestes clusters destacam-se a presença de árvores, áreas permeáveis e sombras naturais, produzidas pelas árvores, e artificiais, produzidas por prédios.

Figura 4.58 - CL9: LCZA(A) e LCZB(B)



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Figura 4.59 - CL8: ZCL4(A), ZCL6(B) e ZCL9(C)



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

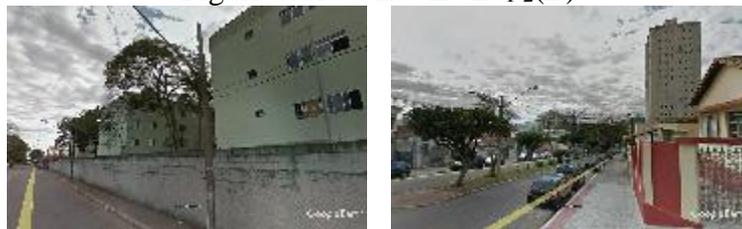
As ZCLs identificadas no CL2 e CL3 foram as associações entre a ZCL3, ZCL1 e ZCL2 (ZCL3₁₋₂) (Figura 4.60 e Figura 4.61). A ZCL1 caracteriza-se pela presença de edificações verticais de grande porte e a ZCL2, por edificações compactas de médio porte.

Figura 4.60 - CL2: ZCL3₁₋₂



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Figura 4.61 - CL3: ZCL3₁₋₂(B)



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

No CL4 foram identificadas associações entre a ZCL6 e ZCL4 (ZCL6₄). Neste *cluster*, observa-se a ocorrência de vegetação de porte arbóreo, áreas permeáveis e sombras produzidas por árvores e por prédios (Figura 4.62).

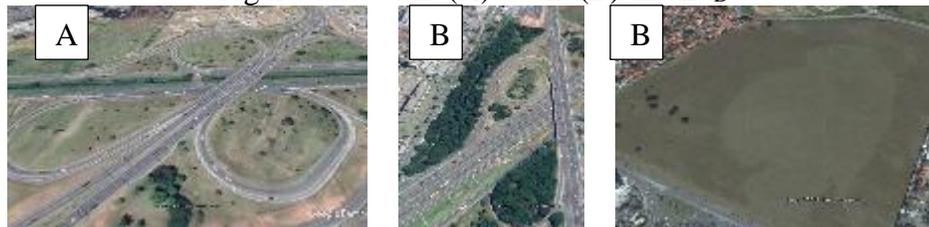
Figura 4.62 - CL4: ZCL6₄.



Fonte: Adaptado de Google Earth” (2019).

As ZCL identificadas nos *clusters* CL5 e CL7 foram: a ZCL9, caracterizada por áreas com construções esparsas e ZCLD, caracterizadas por áreas com predominância de vegetação rasteira (ZCL9_D). Estes *clusters* correspondem a áreas destinadas ao sistema viário urbano ou em processo de urbanização (Figura 4.63).

Figura 4.63 - CL5(A) e CL7(B): ZCL9_D



Fonte: Adaptado de Google Earth” (2019).

A maior diferença de TS entre *clusters* ocorreu entre o CL6 (30°C) e o CL9 (25°C), cuja diferença entre os valores medianos de TS foi de aproximadamente 5°C, ultrapassando 12°C em áreas onde foram identificadas as menores e as maiores TS (

Figura 4.39). As áreas do CL6 obtiveram os menores valores de NDMI (-0,14), FCV (0,7%) e emissividade (0,974) da MC. As áreas do CL9 mostraram os maiores NDMI (0,32), FCV (55,48%) e emissividade (0,984).

Os maiores valores medianos de calor antropogênico ($Q_f = 2,1 \text{ Watts/m}^2 \cdot \text{ano}$), foram obtidos para os *clusters* mais quentes (CL6 e CL1), e o menor valor mediano de Q_f foi obtido para o cluster mais frio (CL9) (Figura 4.44).

Os resultados apontam que nos quatro clusters com menor TS (CL9, CL8, CL7 e CL4) a tendência de resfriamento das superfícies, no período diurno, está associada aos processos de sombreamento e presença de água na superfície. Nessas áreas observa-se a presença de edificações verticais ou prédios e árvores (ZCLA, B, 4 e 6). O sombreamento promove a atenuação da radiação solar incidente, minimizando o ganho de calor nas superfícies e

estruturas urbanas. O sombreamento pode ocorrer naturalmente, dada a presença de árvores, ou artificialmente, em função da presença de construções verticalizadas (prédios).

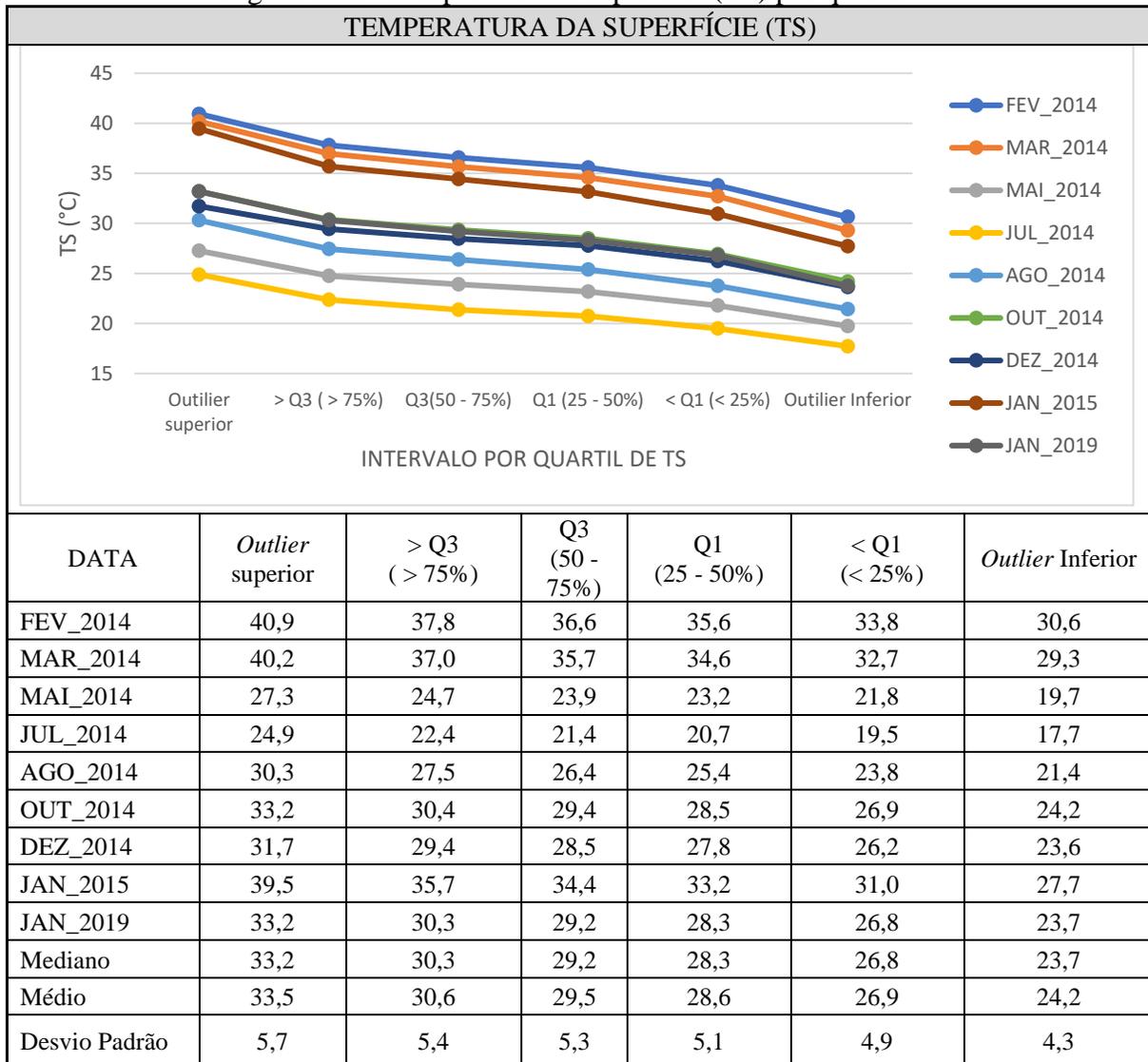
O resfriamento das superfícies também ocorre pela presença de água ou umidade na superfície, que foi detectada pelos índices positivos de NDMI. A umidade, por sua vez, está associada à presença de vegetação e áreas permeáveis, identificada pelos valores de FCV obtidos para estes clusters. A presença da vegetação e áreas permeáveis auxiliam na ocorrência dos fluxos de calor latente, onde o calor da superfície, é processado na evapotranspiração das plantas. As áreas com água também auxiliam no processamento do calor por fluxos de calor latente e promovem o armazenamento de calor dada sua alta capacidade térmica. A presença de vegetação, também auxilia na atenuação de parte da radiação solar incidente na superfície, dada sua capacidade de absorver parte da radiação solar no intervalo do visível, no processo de fotossíntese.

Os resultados obtidos para os clusters mais quentes (CL6, CL1, CL2, CL3 e CL5) apontam que os processos de aquecimento vão se acentuando ao passo que a umidade, vegetação e sombra diminuem, sendo mais intensos em áreas predominantemente impermeabilizadas.

4.5 Análise de Outliers ou resultados extremos

O mapeamento da TS por quartil permitiu identificar áreas com comportamentos diferentes sob as mesmas condições climáticas. A imagem da, exibe os valores medianos de TS obtidos para cada quartil de TS.

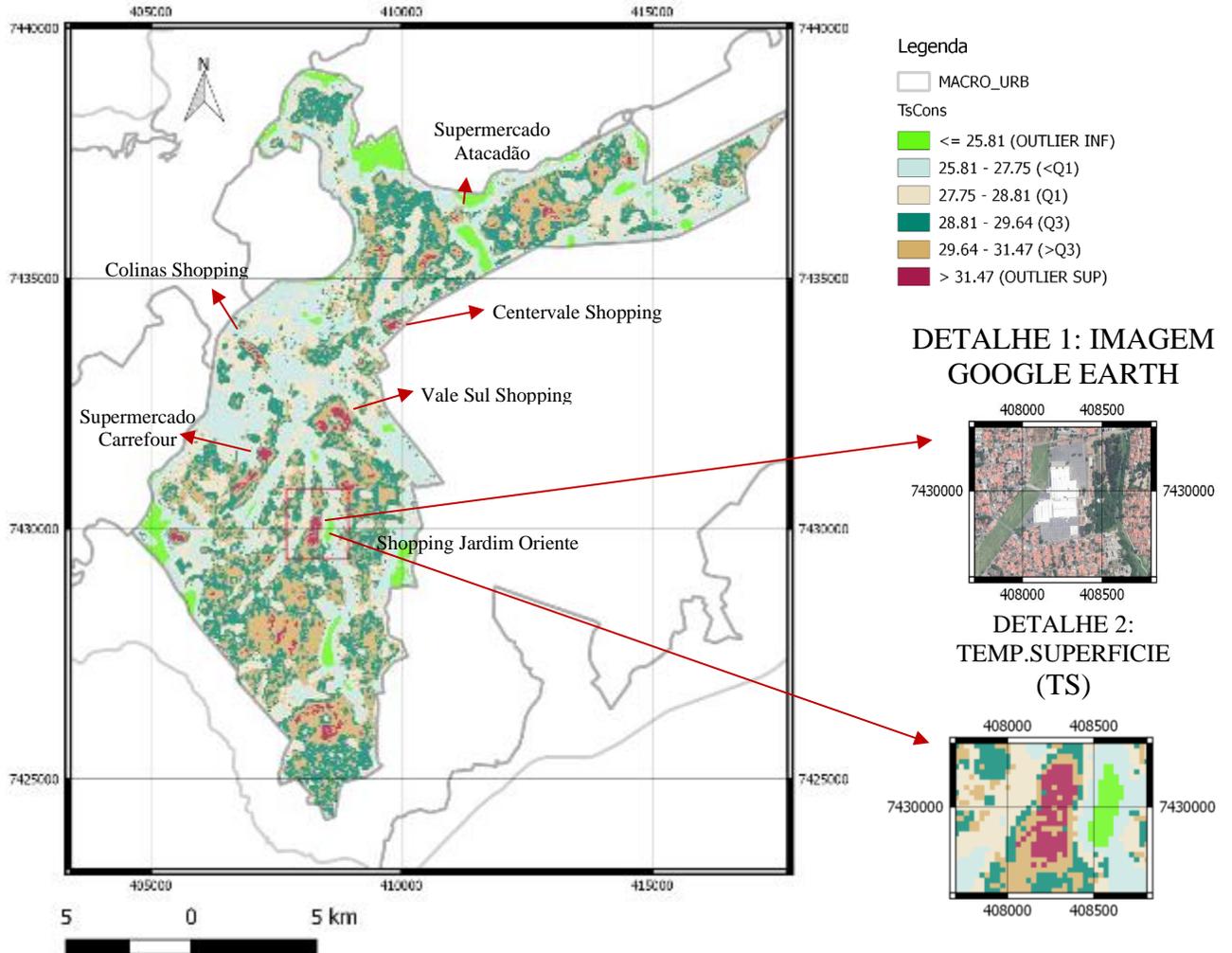
Figura 4.64 - Temperatura de superfície (TS) por quartil



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.65 representa a distribuição de TS por quartil em janeiro de 2019. Nesta data, as áreas com TS inferior a 25,81°C e TS superior a 31,47°C são consideradas outliers, pois estão abaixo e acima dos limites calculados a partir do intervalo interquartil (IQR) (UPTON; COOK, 1996).

Figura 4.65 - Distribuição de TS por quartil em janeiro de 2019

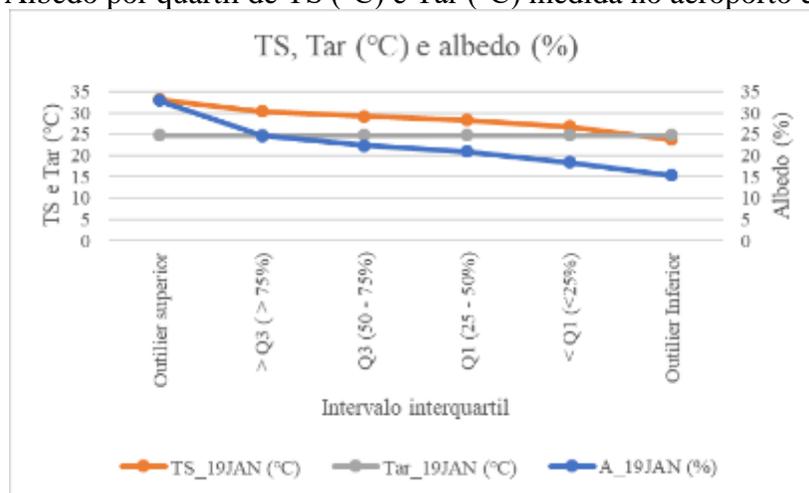


Fonte: Produção do autor.

A áreas mapeadas como outliers superiores, que também foram identificadas como “pontos quentes”, consistem em grandes empreendimentos comerciais (Figura 4.65), característicos das tipologias construtivas encontradas na LCZ8_E. Estes empreendimentos são compostos por construções extensas, circundadas por grandes estacionamentos com pouca ou nenhuma área de sombreamento. Na MC de SJC entre as áreas que receberam esta classificação destacam-se os quatro maiores shopping centers (Vale Sul, Centervale, Colinas e Jd. Oriente) e dois grandes supermercados (Carrefour e Atacadão). Esses empreendimentos são grandes consumidores de energia elétrica em função do uso de sistemas para a climatização e iluminação artificial. Neste processo, geram muito calor antropogênico, o que reflete na temperatura da superfície de suas coberturas, denominadas nesta pesquisa TS. As áreas denominadas como outliers inferiores ou “sumidouros de calor” por sua vez, compõe-se de

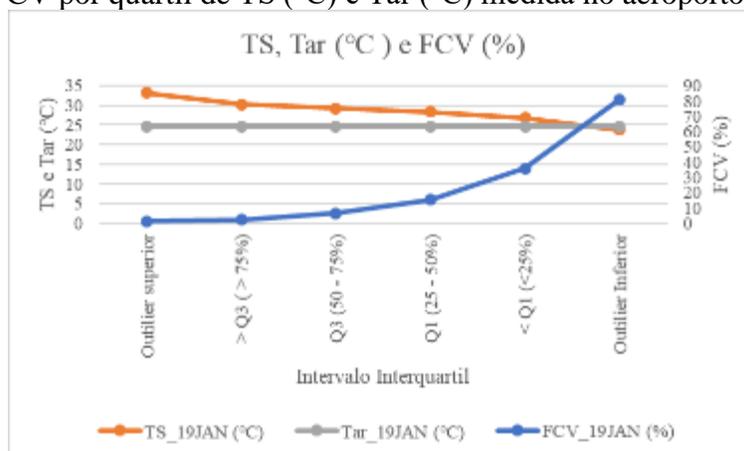
áreas compostas por vegetação de porte arbóreo. No ambiente urbano caracterizam-se por fragmentos florestais, que margeiam os corpos de água ou áreas de transição entre os limites urbano e rural. As Figuras 4.66 a Figura 4.70 apresentam os gráficos obtidos para as análises realizadas em janeiro de 2019, onde são aferidas as medianas do albedo, emissividade, FCV, NDMI e calor antropogênico para cada quartil de TS. Nestes gráficos os resultados são comparado à temperatura do ar medida na estação meteorológica do aeroporto de SJ, na hora da aquisição das imagens. Na comparação entre os dados de Tar e TS pode-se observar, que nas áreas classificadas como *outliers* inferiores de TS, é mínima a diferença entre TS e Tar, indicando a ocorrência da retroalimentação negativa do sistema climático urbano, enquanto nos outliers superiores as diferenças entre TS e Tar, foi de 9°C.

Figura 4.66 - Albedo por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.



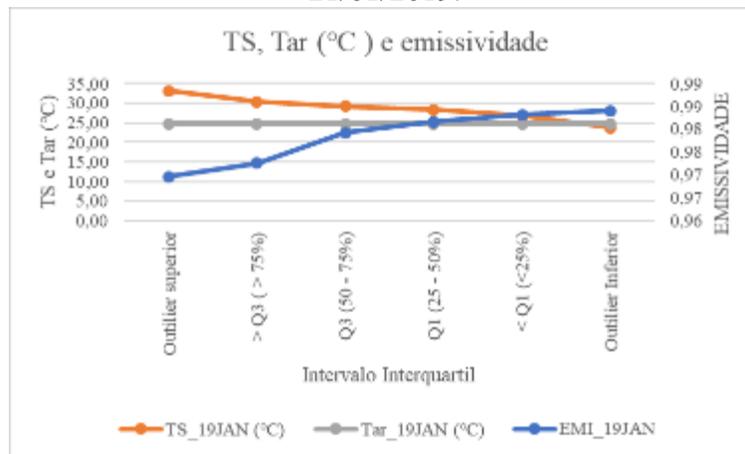
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.67 - FCV por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.



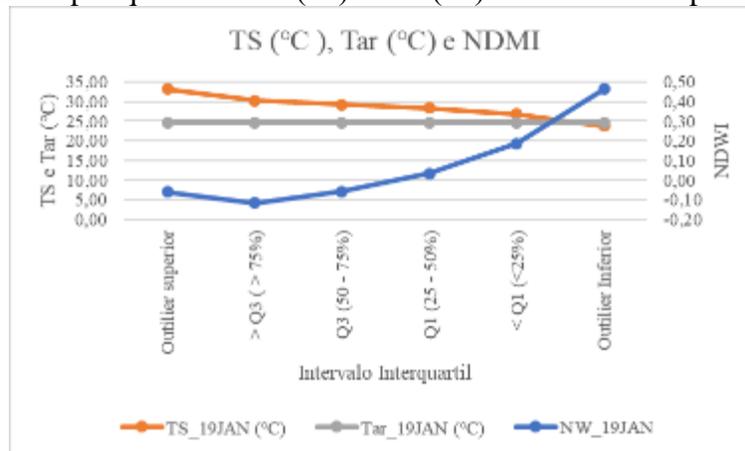
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.68 - Emissividade por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.



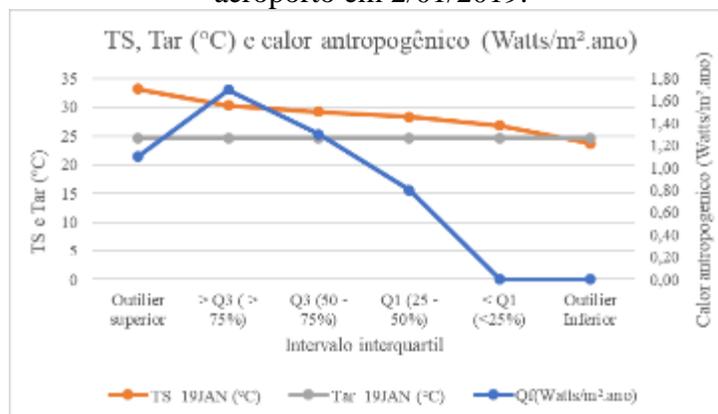
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.69 - NDMI por quartil de TS (°C) e Tar (°C) medida no aeroporto em 21/01/2019.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.70 - Calor antropogênico (Q_f) por quartil de TS ($^{\circ}\text{C}$) e Tar ($^{\circ}\text{C}$) medida no aeroporto em 2/01/2019.

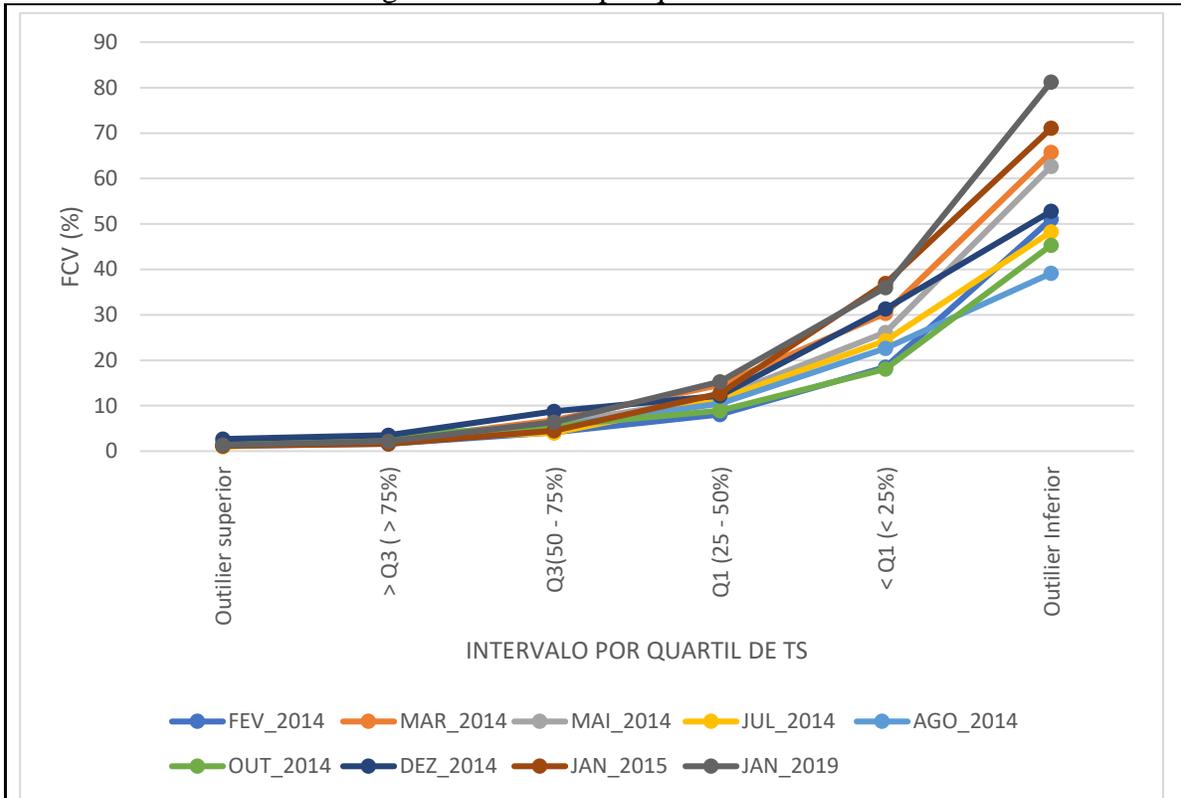


Fonte: Produção do autor.

O mapeamento do calor antropogênico (Q_f) por quartil de TS, que foi calculado com base na densidade demográfica do município e consumo de energia elétrica por habitante, não se mostrou adequado para mapear os maiores emissores de calor antropogênico. A densidade demográfica é calculada com base em polígonos, definidos a partir dos setores sócio econômicos do município, e tem baixa resolução espacial. No gráfico da Figura 4.70 pode-se observar, que nos outliers inferiores, onde as áreas são predominantemente compostas por áreas verdes, com baixa densidade demográfica, os valores de Q_f são compatíveis com o esperado. Nas áreas classificadas como outliers superiores, porém, os valores de Q_f são subestimados, visto que os grandes empreendimentos ocupam extensas áreas, influenciando o cálculo da densidade demográfica.

A análise do comportamento das variáveis espectrais por quartil de TS, em diferentes estações do ano, permitiu que os valores medianos das características espectrais por quartil de TS, para todas as imagens utilizadas nesta pesquisa, fossem estimados. Os resultados são apresentados em forma de gráficos e tabelas (Figura 4.71 a Figura 4.74). Os resultados permitem concluir, que embora existam diferenças dadas as variabilidades climáticas sazonais, existe um padrão de ocorrência nos valores medianos das características espectrais por quartil de TS. As áreas da MC, com TS menor que o valor mediano obtido para o conjunto de dados, em todas as datas analisadas, apresentaram as seguintes características espectrais: FCV acima de 8,10%, emissividade acima de 0,978, albedo menor que 20,90% e NDMI acima de -0,04.

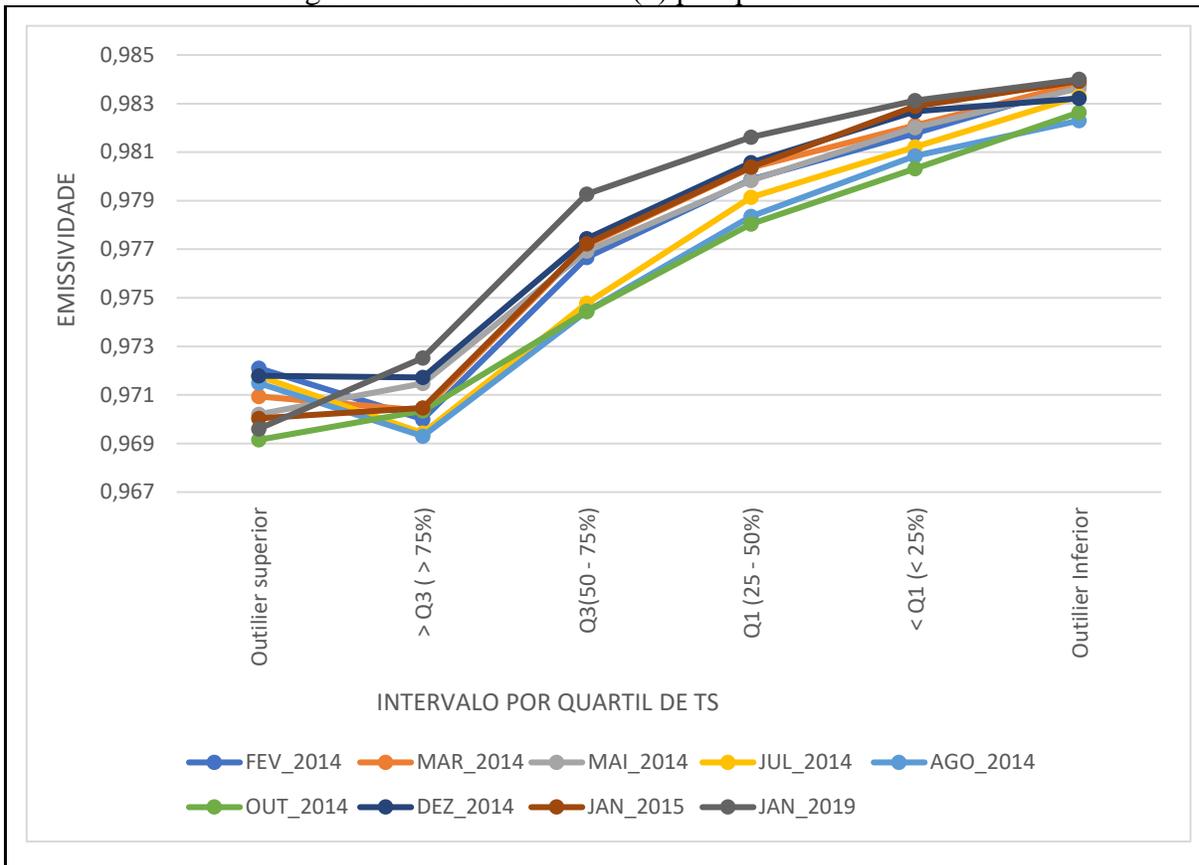
Figura 4.71 - FCV por quartil de TS.



DATA	<i>Outlier superior</i>	> Q3 (> 75%)	Q3 (50 - 75%)	Q1 (25 - 50%)	< Q1 (< 25%)	<i>Outlier Inferior</i>
FEV_2014	1,2	1,6	4,1	8,1	18,5	51,1
MAR_2014	1,4	2,4	6,8	14,6	30,3	65,8
MAI_2014	1,1	2,9	6,1	11,8	26,2	62,7
JUL_2014	1,0	2,7	4,0	11,4	24,3	48,3
AGO_2014	1,9	2,8	5,5	10,5	22,7	39,1
OUT_2014	1,2	3,4	5,6	8,9	18,1	45,3
DEZ_2014	2,7	3,5	8,8	12,2	31,3	52,8
JAN_2015	1,1	1,6	4,5	12,7	36,9	71,1
JAN_2019	1,3	2,2	6,4	15,3	36,0	81,3
Mediano	1,2	2,7	5,6	11,8	26,2	52,8
Médio	1,4	2,6	5,8	11,7	27,1	57,5
Desvio Padrão	0,5	0,7	1,5	2,4	7,0	13,6

Fonte: Produção do autor.

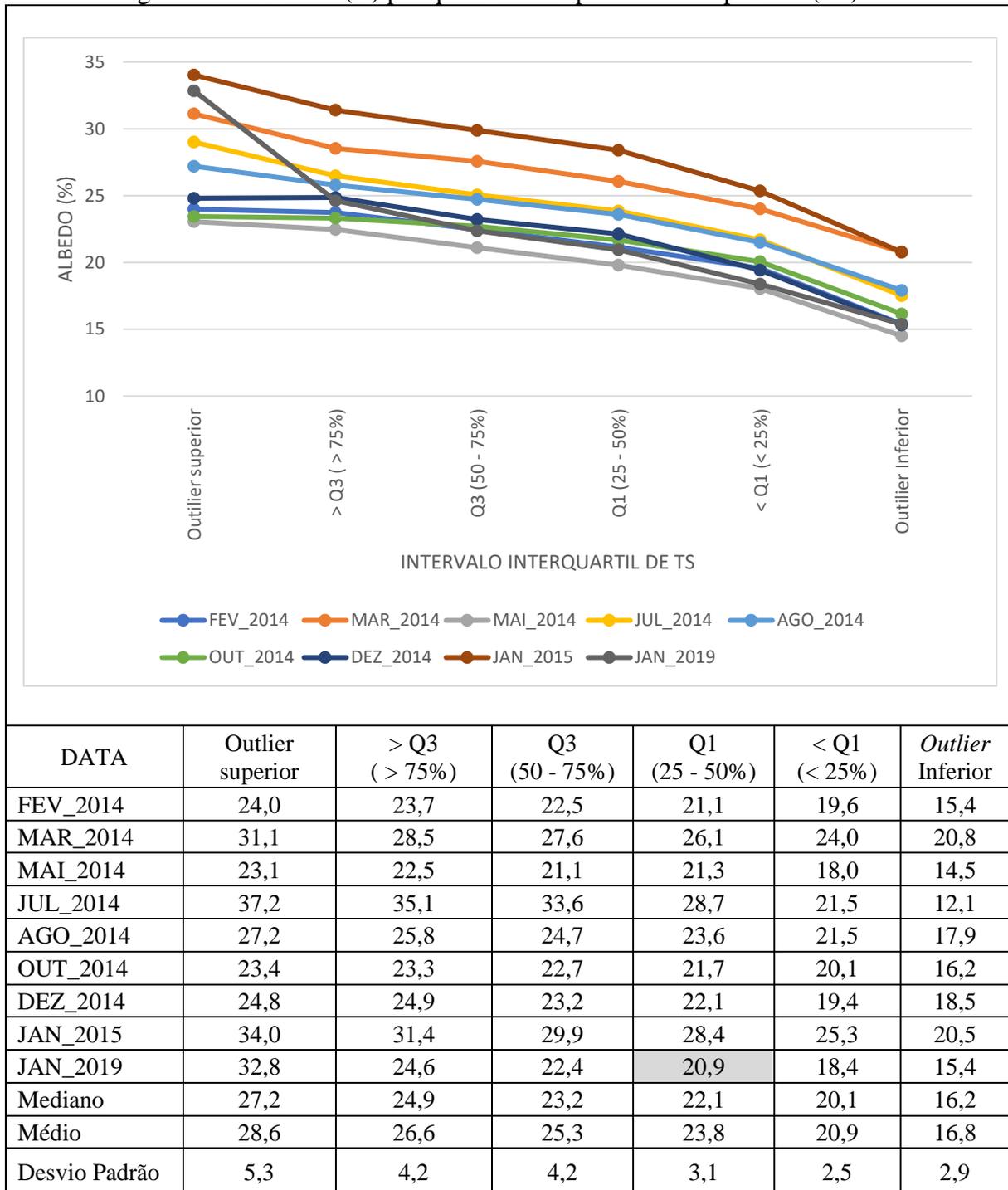
Figura 4.72 - Emissividade (E) por quartil de TS.



DATA	<i>Outlier superior</i>	> Q3 (> 75%)	Q3 (50 - 75%)	Q1 (25 - 50%)	< Q1 (< 25%)	<i>Outlier Inferior</i>
FEV_2014	0,972	0,970	0,977	0,980	0,982	0,984
MAR_2014	0,971	0,970	0,977	0,980	0,982	0,984
MAI_2014	0,970	0,971	0,977	0,980	0,982	0,984
JUL_2014	0,972	0,969	0,975	0,979	0,981	0,983
AGO_2014	0,971	0,969	0,974	0,978	0,981	0,982
OUT_2014	0,969	0,970	0,974	0,978	0,980	0,983
DEZ_2014	0,972	0,972	0,977	0,981	0,983	0,983
JAN_2015	0,970	0,970	0,977	0,980	0,983	0,984
JAN_2019	0,970	0,973	0,979	0,982	0,983	0,984
Mediano	0,971	0,970	0,977	0,980	0,982	0,984
Médio	0,971	0,971	0,976	0,980	0,982	0,983
Desvio Padrão	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001

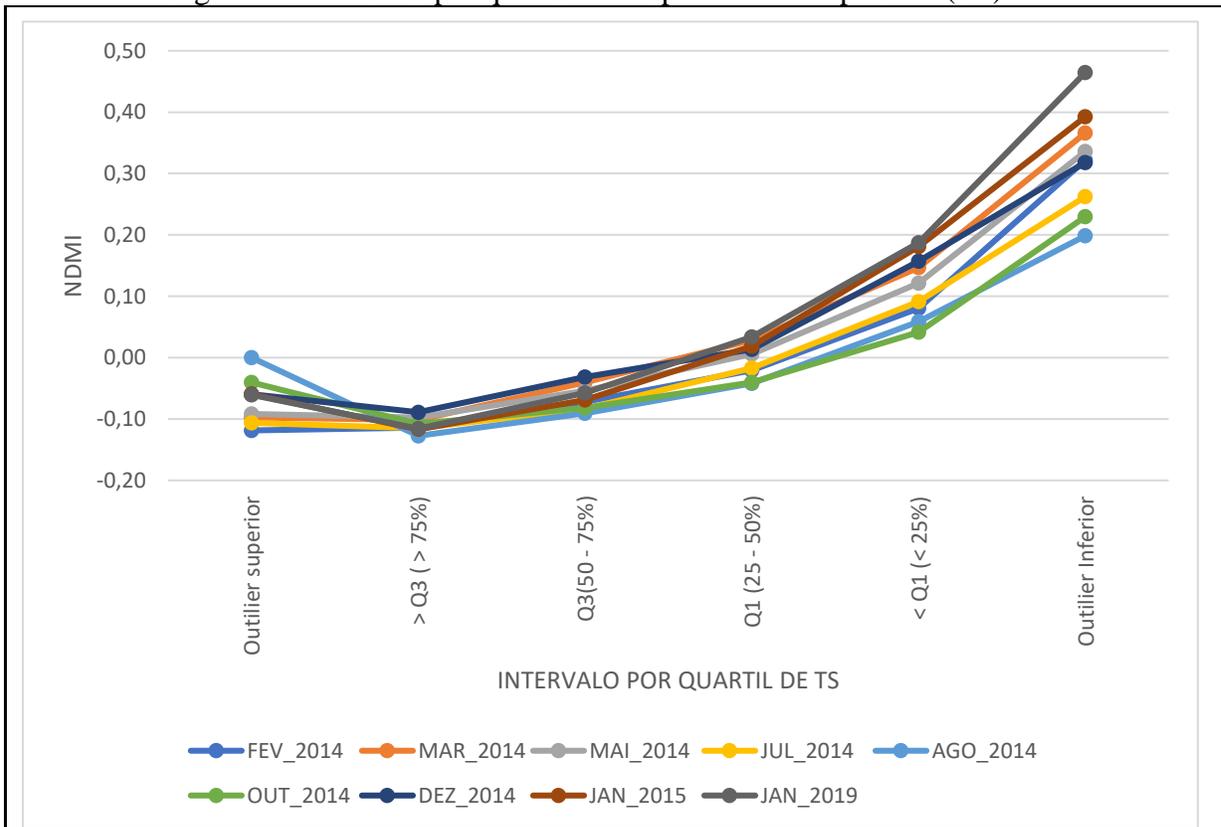
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.73 - Albedo (A) por quartil de temperatura de superfície (TS).



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.74 - NDMI por quartil de temperatura de superfície (TS).



DATA	<i>Outlier superior</i>	> Q3 (> 75%)	Q3 (50 - 75%)	Q1 (25 - 50%)	< Q1 (< 25%)	<i>Outlier Inferior</i>
FEV_2014	-0,12	-0,11	-0,07	-0,02	0,08	0,32
MAR_2014	-0,10	-0,10	-0,04	0,03	0,15	0,37
MAI_2014	-0,09	-0,10	-0,05	0,01	0,12	0,34
JUL_2014	-0,11	-0,11	-0,08	-0,02	0,09	0,26
AGO_2014	0,00	-0,13	-0,09	-0,04	0,06	0,20
OUT_2014	-0,04	-0,11	-0,08	-0,04	0,04	0,23
DEZ_2014	-0,06	-0,09	-0,03	0,01	0,16	0,32
JAN_2015	-0,06	-0,12	-0,07	0,02	0,18	0,39
JAN_2019	-0,06	-0,12	-0,06	0,03	0,19	0,46
Mediano	-0,06	-0,11	-0,07	0,01	0,12	0,32
Médio	-0,07	-0,11	-0,06	0,00	0,12	0,32
Desvio Padrão	0,04	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08

Fonte: Produção do autor.

5 DISCUSSÃO

A estimativa e o mapeamento da área de estudos utilizando as imagens da coleção do satélite *Landsat 8* nível 2 (L8-L2), com resolução espacial de 30 metros e a integração dos resultados num espaço celular com resolução espacial de 60 metros, se mostrou eficaz para produzir diagnósticos e identificar as áreas “chave” do clima urbano, suas características espectrais e padrões da paisagem baseado nas ZCLs. Uma das maiores vantagens de se utilizar os produtos da coleção L8-L2 é que estes produtos já passaram por um processo de correções atmosféricas, o que facilita sua utilização, minimizando os erros na estimativa dos dados para a consolidação do banco de dados espectral. As limitações do L8 estão relacionadas a sua resolução temporal de 16 dias, o que limita o número de imagens disponíveis para produzir uma série temporal contínua, e avaliar o desenvolvimento do fenômeno num mesmo dia, porém a vantagem de seu uso está relacionada a sua resolução espacial e facilidade de aquisição, de maneira gratuita.

A integração das informações das imagens de satélite num espaço celular georreferenciado permitiu identificar características inerentes a cada local, o que é muito útil no desenvolvimento de *benchmarking* para o planejamento urbano, bem como, para a avaliação da eficiência de políticas públicas voltadas para a promoção da adaptação e resiliência ao calor. O modelo de análise proposto, cuja produção de dados e informações é baseada em softwares e banco de dados gratuitos, também pode auxiliar na produção de parâmetros para os modelos climáticos de meso escala, que possuem resolução espacial de quilômetros, sendo está uma das necessidades atuais, visto o avanço nos modelos climáticos de meso escala, que necessitam de parâmetros urbanos mais precisos e com maior resolução espacial (MASSON et al., 2020) .

Os resultados das análises exploratórias permitiram concluir que embora existam diversos índices espectrais aptos a produzir diagnósticos e investigar o fenômeno das ilhas de calor urbanas (BALA et al., 2018; HASANLOU; MOSTOFI, 2015; NARAYANA REDDY; MANIKIAM, 2017; SANTOS et al., 2017; WENG, 2009), os índices e variáveis escolhidos nesta pesquisa, para explicar o desenvolvimento da TS em áreas urbanas se mostraram eficazes, pois permitiram identificar os fatores que interferem na sua distribuição.

Os altos valores negativos de correlação de *Spearman*, obtidos entre a TS e FCV, NDMI e ϵ ($\rho_s > -0,70$), permitiram inferir que os valores obtidos para as variáveis espectrais utilizadas nesta pesquisa, estão correlacionadas com os valores da TS obtidas na área de estudos. Os coeficientes de correlação (ρ_s) negativos, confirmam que quanto maior a presença de vegetação, umidade e água na superfície, o que é detectado pelos altos valores de FCV, NDMI e ϵ , menor a TS. Esses resultados são compatíveis com estudos que analisam os fatores que influenciam o clima urbano e descrevem as técnicas utilizadas para mitigar os efeitos negativos das ilhas de calor urbanas, pelo resfriamento de suas superfícies (AKBARI et al., 2015).

Os coeficientes de correlação (ρ_s), obtidos entre albedo e TS, se mostraram inconclusivos nas análises, visto que vegetação e área construída possuem diferentes maneiras de processar a

radiação solar que sobre elas incide, o que reflete nos coeficientes de correlação estimados entre TS e albedo, principalmente em um ambiente extremamente heterogêneo como é o espaço urbano. A área de estudos é composta por superfícies heterogêneas: áreas com água, vegetação e construções, que possuem diferentes meios de processar a radiação solar incidente. As áreas verdes ou com presença de vegetação, por exemplo, descritas anteriormente como infraestrutura verde, têm alta capacidade de processar o calor, e manter-se mais frias que as áreas construídas, sob as mesmas condições climáticas, pois embora tenham baixo albedo, dada a absorção de parte da radiação Solar Visível, têm alta capacidade de processar o calor. As áreas construídas, por sua vez, possuem albedo superior ao de áreas verdes, porém baixa capacidade de processar o calor, o que induz a TS superiores, fato que causa uma perturbação no resultado de correlação entre TS e A em áreas de composição heterogêneas .

Embora a correlação entre TS e albedo não tenha sido captada nas análises de correlação, esta relação é captada nas análises de auto correlação espacial, análise de *clusters* e análise de distribuição de TS por quartil, que indicam que quanto maior o percentual de FCV, menor o albedo, e quanto menor o FCV maior o albedo.

O albedo de áreas predominantemente ocupadas por vegetação é inferior ao detectado em áreas construídas. A vegetação tem alta capacidade de absorver radiação solar no intervalo visível (JENSEN, 2009), o que leva a baixos valores de albedo e baixa TS. Os materiais construtivos por sua vez, tem diferentes capacidades de refletir a radiação solar visível dependendo de suas características físicas, químicas e rugosidade, bem como suas características de instalação, o que reflete na temperatura de suas superfícies de maneira diferenciada (PRADO; FERREIRA, 2005).

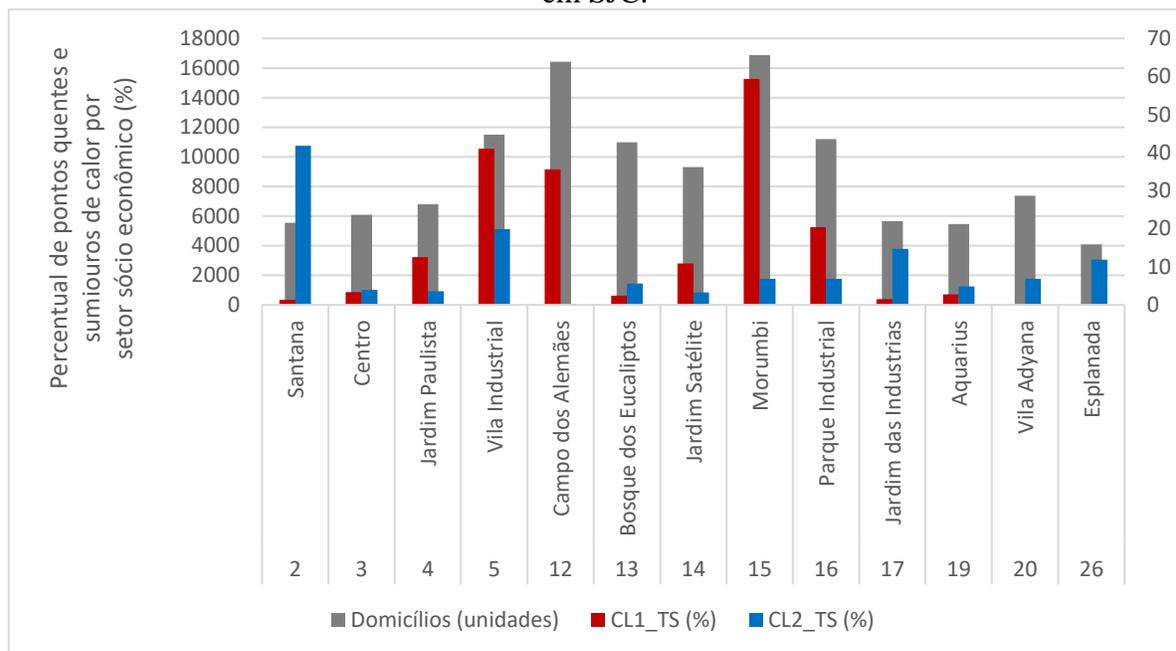
As análises de correlação entre calor antropogênico (Q_f) e TS ($\rho_s < 0,2$), não indicaram correlação entre essas variáveis, porém nas análises dos outliers de TS, esta relação ficou evidenciada. Nas análises de TS por quartil, os *outliers* superiores de TS foram identificadas como os grandes centros comerciais, que são grandes geradores de calor antropogênico. Isso se deve ao fato que nas análises de correlação, o cálculo dos coeficientes foi feito com base nos valores de calor antropogênico obtidos para cada célula, que são calculados com base na densidade demográfica por setor sócio econômico, cujas informações são compiladas em polígonos com baixa resolução espacial.

A análise da dependência espacial de TS utilizando o índice de global e local de *Moran*, para medir a autocorrelação espacial de TS, permitiu concluir que apesar da variabilidade climática sazonal, a dependência espacial da TS ocorre em áreas que apresentam comportamento térmico similar. O mapeamento dos “pontos quentes” e “sumidouros de calor” mostrou ser uma importante ferramenta para o planejamento urbano, visto que permitiu identificar as áreas chave, que influenciam o desempenho térmico e energético das áreas urbanas, consolidadas pelas políticas urbanas ao longo do tempo. A integração de informações multidisciplinares como: características espectrais das superfícies urbanas, dados climáticos e dados sócio econômicos, é essencial para a compreensão dos fatores que influenciam o desempenho térmico e energético em cidades. A integração de dados facilita

na identificação de áreas, que devem ser alvo prioritário das políticas públicas voltadas para promover a resiliência ao calor de modo a atender a demanda da população e em paralelo contribuir para a preservação dos ecossistemas urbanos.

O gráfico da Figura 5.1 apresenta a síntese do mapeamento dos “pontos quentes” e “sumidouros de calor” por setor sócio econômico do município. Nesta análise, o percentual de “pontos quentes” e “sumidouros de calor” por setor sócio econômico é associado ao número de domicílios por setor (PMSJC, 2019).

Figura 5.1 - Percentual de pontos quentes e sumidouros de calor por setor sócio econômico em SJC.



Fonte: Produção do autor.

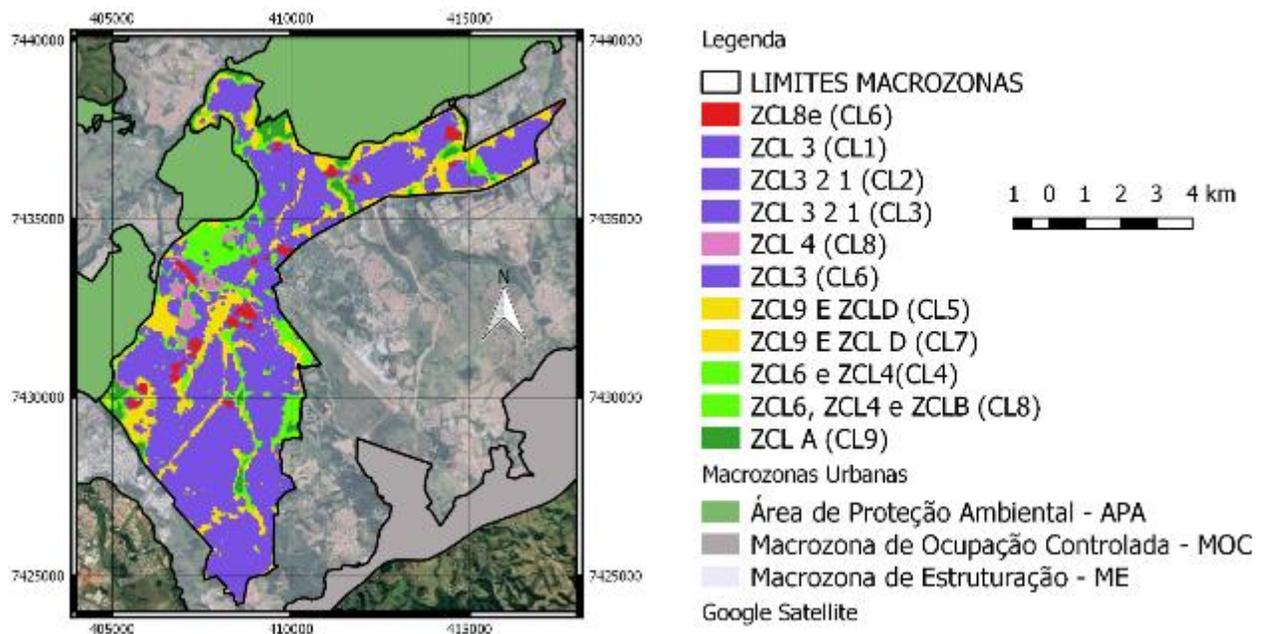
A análise dos resultados apresentados no gráfico da Figura 5.1, indicam por exemplo, que na macrozona de consolidação urbana (MC) de SJC, o setor sócio econômico 12 (Campo dos Alemães), que abriga cerca de 16.421 domicílios, não possui nenhuma área capaz de produzir o efeito de retroalimentação negativa do sistema climático urbano, e que o setor 15 (Morumbi), que abriga cerca de 16.884 domicílios, embora apresente áreas classificadas como “sumidouros de calor” tem um número muito superior de “pontos quentes”, devendo ambos os setores serem alvo prioritário de políticas públicas de adaptação e resiliência ao calor.

Na macrozona de consolidação urbana (MC) de SJC, o percentual de áreas ocupadas por “pontos quentes” e de áreas ocupadas por “sumidouros de calor” é bem próximo. Ambas ocupam aproximadamente 10% da área da MC. Enquanto as áreas classificadas como “pontos quentes” indicam as áreas que devem ser alvos de políticas de adaptação e resiliência

ao calor, onde o balanço de energia na superfície deve ser aprimorado, através da implantação de infraestrutura verde, cinza, as áreas classificadas como “sumidouros de calor” indicam áreas que devem ser prioritariamente preservadas. Os “sumidouros de calor” promovem o efeito de retroalimentação negativa do sistema climático urbano, sendo sua manutenção essencial para garantir a preservação dos ecossistemas urbanos e condições microclimáticas, pois apresentaram temperaturas mais baixas que 90% das áreas que compõe a macrozona urbana do município.

O mapeamento de *clusters* de TS e a classificação das áreas urbanas em ZCLs, permitiu identificar áreas, classificadas como *clusters* diferentes, mas com a mesma classificação de ZCL (Figura 5.2). Os resultados do mapeamento apontam que aproximadamente 59% da área da macrozona de consolidação urbana de SJC é predominantemente ocupada por edificações esparsas de pequeno porte (ZCL3), 18% por construções esparsas associadas à vegetação (ZCL9_D), 18% por edificações de pequeno e grande porte intercaladas por vegetação (ZCL6 e ZCL4), 4% por vegetação de porte arbóreo (ZCL_A) e 2% por construções extensas em áreas plenamente impermeabilizadas (ZCL8_E).

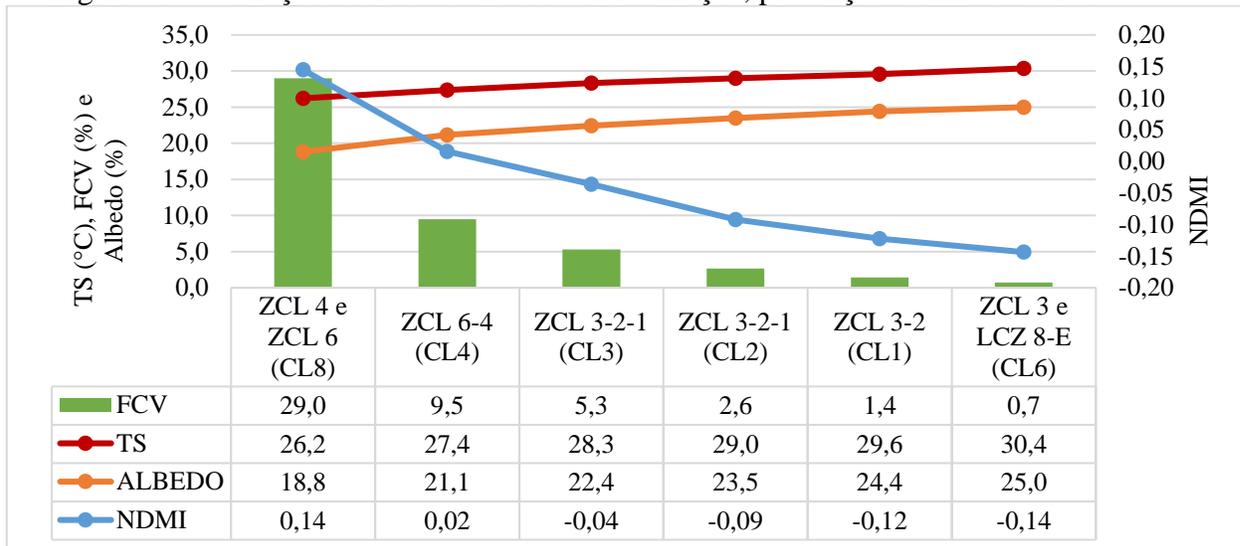
Figura 5.2 - Zonas climáticas locais em MC de SJC



Fonte: Produção do autor.

A identificação das tipologias urbanas, onde a ZCL3 é predominante, e onde ocorrem a ZCL4 e ZCL6, permitem inferir que o decaimento da TS ocorre em função da verticalização das construções, associada à vegetação e onde áreas permeáveis se fazem presentes, podendo este efeito ser observado nos dados compilados da Figura 5.3.

Figura 5.3 - Variação da TS associada à verticalização, presença de umidade e FCV .



Fonte: Produção do autor.

A influência da presença de vegetação de porte arbóreo e de sombra também se mostra evidente nas análises dos resultados do CL5 e CL7, onde observa-se a ZCL9D. Se no CL5 as construções esparsas do sistema viário estão associadas à vegetação rasteira, no CL7 já se observa a presença de vegetação de porte arbóreo, ou a predominância de áreas verdes, o que resulta numa menor TS (CL5(A) e CL7(B): ZCL9D (Figura 4.63).

Os resultados obtidos para os 4 clusters que apresentaram as menores TS na MC (CL9, CL8, CL7 e CL4) apontam que a tendência de resfriamento das superfícies, no período diurno, está associada aos processos de sombreamento e em função da presença de água ou umidade na superfície. O sombreamento promove a atenuação da radiação solar incidente, minimizando o ganho de calor nas superfícies e pode ocorrer naturalmente, dada a presença de árvores ou artificialmente, em função da presença de construções verticalizadas, quando associadas às áreas verdes. A umidade, associada à presença de vegetação e áreas permeáveis auxilia na ocorrência dos fluxos de calor latente, que processam o calor retido na superfície.

Os resultados obtidos para os clusters mais quentes (CL6, CL1, CL2, CL3 e CL5) apontam que os processos de aquecimento estão associados a ausência de umidade, vegetação e sombra, em áreas predominantemente impermeabilizadas.

A análise dos clusters confirma os resultados obtidos nas análises de correlação, que apontam que baixas TS estão associadas à alta emissividade, presença de água e vegetação, e baixo albedo. Os resultados refletem as características termo físicas das superfícies na escala urbana, composta por superfícies heterogêneas, onde vegetação e área construída ocorrem em paralelo, e para as quais quanto maior o FCV detectado na célula, maior a absorção de radiação solar visível e menor o A.

A compilação dos resultados de todas as análises exploratórias, bem como os diagnósticos aferidos para a área de estudos, permitiram concluir que a retroalimentação negativa do sistema climático urbano ocorre em áreas onde o impacto da radiação solar no meio ambiente urbano, que induz ao aumento da temperatura das superfícies é atenuado pelo uso de vegetação e sombra. Conclusões similares foram relatadas, em outras pesquisas realizadas para averiguar a influência das tipologias urbanas no clima urbano (AKBARI et al., 2015; ALCHAPAR et al., 2017; FAN; WANG, 2020; FERREIRA; DUARTE, 2019, 2018; GOMES; LAMBERTS, 2009).

Neste contexto, conclui-se que na área de estudos as principais intervenções no tecido urbano, que podem ser aplicadas como infraestrutura verde, azul e cinza, para promover o efeito de retroalimentação negativa do sistema climático urbano e aprimorar o desempenho térmico e energético das superfícies na área de estudos consistem em:

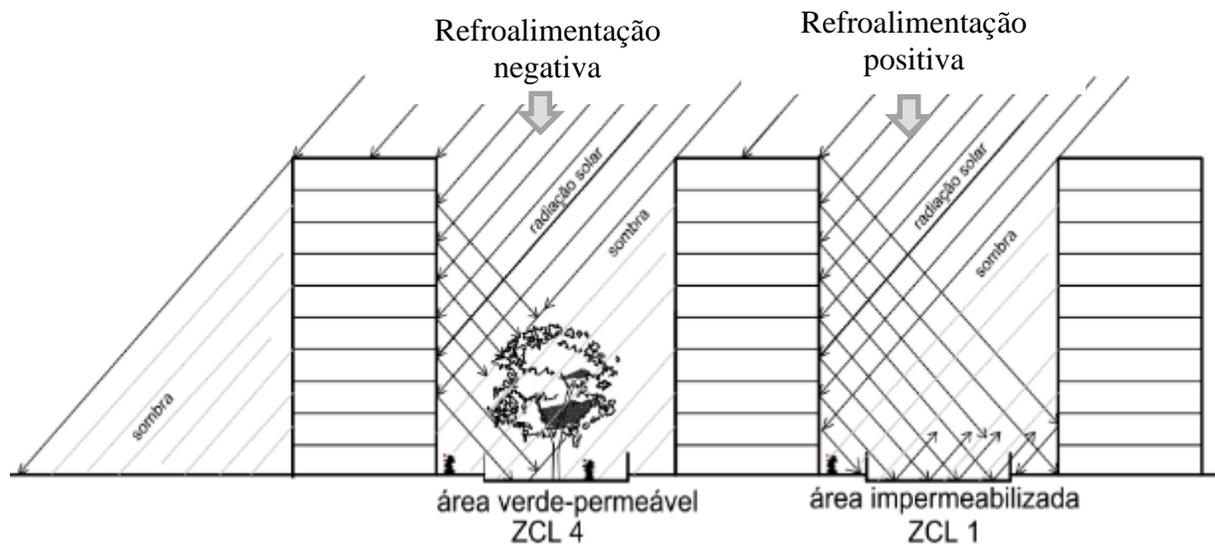
- a) ampliar as áreas de sombra pela implementação de árvores e estender as políticas de arborização voltadas para os espaços privados além das áreas públicas;
- b) ampliar as áreas de sombra pelo incentivo à verticalização de construções, em áreas predominantemente horizontais, desde que associadas a áreas arborizadas e permeáveis;
- c) recuperar a capacidade de percolação de água no solo através da incorporação de áreas permeáveis dentro e fora dos lotes.

A ampliação das áreas de sombra pela implementação de políticas de arborização urbana é essencial para a atenuação da temperatura das superfícies em áreas urbanas. Atualmente no Brasil a maioria das ações que visam a implementação de árvores no espaço urbano, consistem em intervenções no espaço público. No Brasil são raras as exceções que abordam o tema do uso da vegetação em áreas privadas. Uma exceção é a “quota ambiental” inserida como parâmetro urbanístico na lei de zoneamento do município de São Paulo, obrigatória para empreendimentos locados em terrenos com área superior a 500,00 m². A quota ambiental consiste em uma pontuação mínima, que deve ser atingida pela aplicação de medidas de sustentabilidade em projetos novos e de reformas. Essa pontuação é estabelecida em função dos elementos constituintes do projeto: porte da arborização, soluções de retenção de água, paredes e tetos verdes (PMSP, 2016).

Em São José dos Campos, o plano de arborização urbana prevê o plantio de aproximadamente 56.500 árvores nas vias públicas urbanas até 2029. O plano de arborização de SJC estabelece que as árvores devem ser entendidas como equipamentos urbanos, que contribuem, para a promoção de diversos serviços ambientais. No plano de arborização os critérios de plantio de árvores em vias públicas são estabelecidos a partir das características construtivas de cada local, considerando fatores como acessibilidade e infraestrutura urbana. O plano de arborização também incentiva o uso de calçadas verdes e pavimentos permeáveis em suas construções, que podem auxiliar nos processos de drenagem urbana, contribuir para evitar enchentes e reduzir o calor (IPPLAN, 2016).

A ampliação de áreas de sombra pelo incentivo à verticalização de construções, desde que associadas a áreas arborizadas e permeáveis também produz o efeito de retroalimentação negativa do sistema climático urbano. Na área de estudos esse efeito se mostrou evidente em áreas classificadas como ZCL4 onde edificações verticais de grande porte estão associadas à vegetação. Nestas áreas a radiação solar que incide sobre as edificações e reflete para superfície é absorvida pela vegetação inserida em áreas adjacentes as construções, dentro ou fora dos lotes. Na retroalimentação negativa a atenuação da radiação solar sobre o ambiente edificado resulta em menores TS, dada a diminuição de carga térmica sobre as edificações e áreas adjacentes, efeito que contribui para a atenuação das ilhas de calor no período diurno e no período noturno (Figura 5.4).

Figura 5.4 - Efeito de retroalimentação negativa e positiva do sistema climático urbano, dado pela utilização de vegetação.



Fonte: Produção do autor.

O desempenho térmico e energético das áreas urbanas, onde ocorrem os processos de verticalização, também está associado ao fator de forma ou canyon urbano, definido pela razão entre alturas das edificações (H) e o espaçamento entre elas (W), e à quantidade de calor antropogênico gerado pelas edificações, que está associado à densidade demográfica do local e o consumo de energia por habitante, entre outros fatores como a posse de equipamentos e padrões de consumo e hábitos da população.

O fator de forma influencia diretamente na quantidade de radiação solar que incide sobre o tecido urbano. Em países como o Brasil, os níveis de radiação solar diários, que incidem sobre as superfícies terrestres, variam entre 173 e 255 W/m^2 . Esses níveis de radiação solar são superiores aos níveis que ocorrem nos países europeus e da América do Norte (Tabela 2.1). Por outro lado, nos países desenvolvidos como os europeus, e países da América do Norte, o consumo de energia elétrica por habitante é superior ao consumo de energia por habitante no Brasil (Tabela 2.2). Em economias mais desenvolvidas, como Estados Unidos

e na Alemanha, por exemplo, a média anual de consumo de energia elétrica por habitante foi de aproximadamente 1472 e 799 Watts/habitante respectivamente, enquanto no Brasil a média de consumo de energia elétrica foi de 285 Watts/habitante no ano de 2015.

Na área de estudos, o calor antropogênico (Watts/m²) máximo, gerado anualmente, calculado com base no consumo de energia elétrica por habitante (342,5Watts/habitante) e densidade demográfica nos setores sócio econômicos, foi de aproximadamente 2,8 Watts/m². Embora esses valores tenham sido aferidos com base em um método simplificado, devido à escassez de dados com alta resolução espacial, os resultados permitem concluir, que o impacto da radiação solar (190 Watts/m².dia), na temperatura das superfícies e na temperatura do ar no período noturno e diurno área de estudos, é maior que o impacto do calor antropogênico gerado pelo consumo de energia nas edificações.

Se por um lado as áreas verticalizadas, consistem em áreas densamente povoadas, onde observa-se o alto consumo de energia elétrica, com alta emissão de calor antropogênico, a verticalização das construções, nos padrões propostos pela ZCL4, onde pode-se observar a presença de vegetação e áreas de drenagem, pode favorecer a redução das temperaturas da superfície e temperatura do ar. As edificações verticais, promovem o sombreamento, sobre as áreas adjacentes, diminuindo o impacto da radiação solar sobre as superfícies horizontais, quando associadas à vegetação esse impacto é atenuado. As edificações verticais também estão mais sujeitas a perdas de calor sensível, dadas ao turbilhonamento dos ventos e trocas térmicas, que são mais intensas nas camadas mais altas da atmosfera.

È importante ressaltar, que nem sempre as áreas verticalizadas são as mais populosas e adensadas. Em São José dos Campos, por exemplo, os setores sócio econômicos, onde observa-se maior quantidade de edificações verticais são o Jd. Aquarius e Vila Adyana, com densidade domiciliar de 2,9 e 2,5 habitantes por domicílio, e densidade demográfica de 3668 e 7886 habitantes por km² (Tabela 3.1). Nos setores sócio econômicos Campo dos Alemães e Morumbi, por exemplo, onde a maioria das edificações caracterizam-se por edificações horizontais, com um ou dois pavimentos, a densidade domiciliar é de 3,8 e 3,3 habitantes por domicílio, superior às dos setores verticalizados e a densidade demográfica é de 6393 e 8122 habitantes por km². Esses valores são bem próximos do setor Vila Adyana, que é o setor mais verticalizado do município.

A recuperação da capacidade de percolação de água no solo, está associada à promoção do aumento da ocorrência de fluxos de calor latente (λE). A umidade presente no solo e na vegetação, auxilia na promoção dos fluxos de calor latente, entre outros benefícios, não avaliados nesta pesquisa, como o aumento da capacidade de percolação de água no solo, para a alimentação dos lençóis freáticos, e a prevenção de enchentes. Na área de estudos, o efeito de retroalimentação negativo das áreas permeáveis, se mostrou evidente comparando-se as tipologias urbanas observadas nos “pontos quentes” e “sumidouros de calor”. Enquanto nos “pontos quentes”, observam-se extensas construções em superfícies plenamente impermeabilizadas, com área superior a 3600m², classificadas com ZCL_{8E}, e valores negativos de NDMI, nos sumidouros de calor observam-se áreas plenamente permeáveis e arborizadas (LCZ_{AB}), com NDMI positivos. O NDMI pode fornecer informações

simultâneas sobre o conteúdo de vegetação e água nas superfícies, elementos essenciais para garantir os índices de umidade adequados ao conforto humano.

Os diagnósticos obtidos pela integração das informações, são ferramentas úteis, que podem auxiliar no desenvolvimento de políticas urbanas de adaptação e resiliência ao calor em áreas urbanas. O monitoramento da temperatura das superfícies ao longo do tempo, pode por exemplo, fornecer informações sobre o desempenho da aplicação de políticas de arborização urbanas. As imagens da

Figura 5.5 apresentam um exemplo de uma área com 3600m^2 (60×60 metros), localizada em SJC, adjacente ao sistema viário, que passou pelo processo de reflorestamento. Em 2014, antes do reflorestamento, a TS era de aproximadamente $35,18^\circ\text{C}$ e em 2019, já reflorestada a TS caiu para $27,19^\circ\text{C}$.

Figura 5.5 - Exemplo de área alvo de política urbana de arborização.



Fonte: Adaptado de: (“Google Earth”, [s.d.])

A compilação dos resultados obtidos pelas análises e diagnósticos, realizados nesta pesquisa, concluiu que a temperatura das superfícies (TS) e o índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) podem ser utilizados como indicadores do desempenho térmico e energético de áreas urbanas. A TS pode indicar as áreas vulneráveis ao calor ou grandes geradores de calor antropogênico, bem como as tipologias urbanas associadas. O NDMI pode fornecer informações sobre áreas predominantemente impermeabilizadas, com pouca ou nenhuma vegetação e sombra.

6 CONCLUSÃO

O método de mapeamento proposto nesta pesquisa, baseado em banco de dados e softwares gratuitos, é uma ferramenta que pode ser utilizada por urbanistas e planejadores urbanos no sentido de auxiliar o desenvolvimento de políticas urbanas de adaptação e resiliência ao calor e, como consequência, economia de energia. O mesmo permite identificar áreas onde o balanço de energia na superfície pode ser aprimorado, para mitigar os efeitos do calor no ecossistema urbano e na saúde humana, identificar áreas de risco ao calor ou outros eventos que se pretende mapear, e avaliar a real eficiência da implantação de políticas públicas voltadas para melhorar as condições ambientais nos centros urbanos.

A integração de informações georreferenciadas em um grade regular ou espaço celular, criado a partir da discretização de unidades territoriais urbanas em células de 60x60metros, mostrou-se eficaz para a produção de informações, em alta resolução espacial, que podem ser utilizadas para produzir diagnósticos na escala local, micro ou macro climática, dependendo do número de células agrupadas. O procedimento pode auxiliar em parametrizações para aplicação em modelos numéricos de previsão climática em meso escala, cuja resolução é dada a partir de quilômetros, e identificar áreas vulneráveis e prioritárias, para as quais se fazem necessárias intervenções pontuais, bem como fornecer diagnósticos localizados.

Os coeficientes de correlação de *Spearman*, obtidos entre a temperatura das superfícies (TS) e as variáveis espectrais, mostraram que a redução da TS está diretamente relacionada ao aumento do FCV, ϵ e NDMI e que a correlação entre albedo (A) e temperatura das superfícies (TS) é afetada pela presença de vegetação na célula, devendo-se considerar esta relação na interpretação dos resultados. Se na escala da edificação, quanto maior o albedo menor o impacto da radiação solar no ganho de calor e menor a TS, na escala urbana os resultados devem ser interpretados considerando que os valores de albedo, são afetados pela presença de vegetação, que possui albedo inferior ao obtido para as áreas construídas, visto que absorve radiação solar no intervalo visível em seu processo metabólico.

Nesta pesquisa, os índices de autocorrelação espacial de *Moran*, acima de 0,65, permitiram inferir a dependência espacial TS, apesar da variabilidade climática sazonal, o que facilita na compreensão da dinâmica sócio espacial que influencia a consolidação do microclima urbano e na identificação de tipologias urbanas associadas ao aquecimento e resfriamento das superfícies urbanas.

A compilação dos resultados obtidos nas análises exploratórias, apontam que a diferença de TS, entre os “pontos quentes” e “sumidouros de calor”, na área de estudos chegou a 12°C. A análise dos resultados permitiu concluir que os processos de resfriamento das superfícies urbanas, estão associados à presença umidade, vegetação e sombra, identificadas pelos índices positivos de NDMI, que podem ser introduzidas no meio ambiente urbano através da aplicação de infraestrutura azul, verde e cinza de forma combinada. Essa conclusão foi possível a partir da observação das associações espaciais entre temperatura das superfícies,

características espectrais e suas associações com as diferentes zonas climáticas locais identificadas na área de estudos.

Os resultados das análises permitem inferir que as intervenções no tecido urbano, voltadas para promover a resiliência ao calor, produzindo o efeito de retroalimentação negativa do sistema climático urbano, que podem ser utilizadas como tecnologias solares passivas e implementadas através de infraestrutura verde, azul, cinza, devem se concentrar em: (1) ampliar as áreas de sombra pela implementação de árvores e estender as políticas de arborização para os espaços privados e não só para áreas públicas; (2) ampliar as áreas de sombra pelo incentivo à verticalização de construções, em áreas predominantemente horizontais, desde que associadas a áreas arborizadas e permeáveis e (3) recuperar a capacidade de percolação de água no solo através da incorporação de áreas permeáveis dentro e fora dos lotes.

Esta pesquisa conclui que a temperatura das superfícies e o NDMI podem ser utilizados como indicadores do desempenho térmico e energético de áreas urbanas, pois permitem identificar áreas e fatores que influenciam os processos de retroalimentação negativa e positiva do sistema climático urbano, zonas climáticas locais associadas e avaliar o impacto de políticas voltadas para promover a adaptação e a resiliência urbana ao calor.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugere-se:

1. Aplicar o método de estimativa, mapeamento e integração de dados em outras áreas urbanas consolidadas, no sentido de comparar os resultados obtidos para em zonas climáticas locais similares sob condições climáticas diversas;
2. Complementar as informações espectrais utilizando satélites com uma maior resolução temporal e espacial;
3. Avaliar o impacto de diferentes fatores de forma no desempenho de áreas com potencial de verticalização;
4. Desenvolver metodologia para aferição de calor antropogênico com maior precisão e resolução espacial;
5. Inserir variáveis sociais e econômicas no modelo proposto;
6. Validar os resultados, obtidos por sensores remotos, por dados obtidos por experimentos observacionais e medições em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15220-3-Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.]. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Acesso em: 7 fev. 2019.

ABREU-HARBICH, L. V. DE; LABAKI, L. C.; MATZARAKIS, A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 99–109, 2015.

AKBARI, H. et al. LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. **JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT**, v. 22, n. 1, p. 1–16, 18 dez. 2015.

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. **Climatic Change**, v. 94, n. 3–4, p. 275–286, 2009.

ALCHAPAR, N. L. et al. The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, n. 1–2, p. 35–50, 2017.

ANSELIN, L. **Exploring Spatial Data with GeoDa TM: A Workbook Center for Spatially Integrated Social Science**. Disponível em: <<http://sal.uiuc.edu/http://www.csiss.org/>>. Acesso em: 22 ago. 2019.

ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association-LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93–115, 3 set. 2010.

ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 12, n. 4, p. 313–329, 1 set. 1982.

BALA, R. et al. A COMPARATIVE STUDY OF LAND SURFACE TEMPERATURE WITH DIFFERENT INDICES ON HETEROGENEOUS LAND COVER USING LANDSAT 8 DATA. 2018.

BARBIRATO, G. M.; TORRES, S. C.; SOUZA, L. C. L. DE. **Clima urbano e eficiência energética nas edificações**. Rio de Janeiro: [s.n.].

BAZAZ, A. et al. **Summary for Urban Policymakers – What the IPCC Special Report on 1.5C Means for Cities**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://doi.org/10.24943/SCPM.2018>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

BECHTEL, B.; DANEKE, C. Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 5, n. 4, p. 1191–1202, 2012.

BRASIL. **Lei n. 10.257 de 10 de Julho de 2001. Estatuto das Cidades.** Brasil, 2001. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2001/lei-10257-10-julho-2001-327901-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 19 mar. 2020

BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. **Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands.** Atmospheric Environment. **Anais...**1998

BUTERA, F. et al. **SUSTAINABLE BUILDING DESIGN FOR TROPICAL CLIMATES Principles and Applications for Eastern Africa United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) The project “Promoting Energy Efficiency in Buildings in East Africa” is an initiative of UN-Habitat i.** Ball Sue ed. Nairobi: [s.n.].

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 241–252, 1 dez. 1997.

CETESB. **Serviços - CETESB.** Disponível em: <<http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/conDadosHorarios.do?method=gerarRelatorio>>. Acesso em: 29 out. 2018.

CHEREMISINOFF, P. N.; REGINO, T. C. **Principles & applications of solar energy.** [s.l.] Ann Arbor Science Publishers, 1978.

CHUVIECO, E.; HUETE, A. **Fundamentals of satellite remote sensing.** [s.l.] CRC Press, 2010.

CLARKE, K. C. Mapping and modelling land use change: an application of the SLEUTH model. **Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**, n. 9783540691679, p. 353–366, 2008.

DRUCK, S. et al. **Análise espacial de dados geográficos.** Brasília: Empraba Cerrados, 2004.

DU, C. et al. A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data. **Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 647–665, 8 jan. 2015.

DUFFIE, J. .; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 4. ed. New Jersey: [s.n.].

ECOSTRESS. **ECOSTRESS Spectral Library - Version 1.0 — ECOSTRESS Speclib.** Disponível em: <<https://speclib.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

EMPLASA. **Unidades de Informações Territorializadas (UITs) Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte.** São Paulo, SP. Brasil: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2013. Disponível em: <www.emplasa.sp.gov.br>.

EPE. **Demanda de Energia 2050 Estudos da demanda de energia.** Rio de Janeiro, RJ:

[s.n.]. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA 13-14 Demanda de Energia 2050.pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA_13-14_Demanda_de_Energia_2050.pdf)>.

EPE. **Consumo anual de Energia Elétrica por classes, regiões e subsistemas.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>>. Acesso em: 30 jan. 2020.

EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO DO QGIS. **QGIS 2.18.27** Las Palmas, 2017. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 4 nov. 2017

FAN, C.; WANG, Z. Spatiotemporal Characterization of Land Cover Impacts on Urban Warming: A Spatial Autocorrelation Approach. **Remote Sensing**, v. 12, n. 10, p. 1631, 20 maio 2020.

FERNANDES, R. B. A. et al. **Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa** *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, mar. 2004.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. H. S. Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. **Urban Climate**, v. 27, p. 105–123, 1 mar. 2019.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. S. H. **Land surface temperature, vegetation cover and urban morphology over different local climate zones in São Paulo Metropolitan Region.** Nova York: 10th International Conference on Urban Climate/ 14th Symposium on the Urban Environment, 2018

FLIR. **FLIR T600 Thermal Camera for Predictive Maintenance | FLIR Systems.** Disponível em: <<https://www.flir.com/products/t600/>>. Acesso em: 16 mar. 2019.

GAO, B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257–266, 1 dez. 1996.

GCCA. **A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.coolroof toolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2019.

GEA. **Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future** *Toward a Sustainable Future.* Laxenburg, Austria: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.iiasa.ac.at/Research/ENE/GEA/>>.

GEODA. UNIVERSITY OF CHICAGO. **GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis | Spatial@UChicago | The University of Chicago**, [s.d.]. Disponível em: <<https://spatial.uchicago.edu/geoda>>. Acesso em: 5 nov. 2019

GEODA. **Documentation | GeoDa on Github.** Disponível em: <<http://geodacenter.github.io/documentation.html>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

GEODA. **Basic Mapping.** Disponível em: <http://geodacenter.github.io/workbook/3a_mapping/lab3a.html>. Acesso em: 22 ago. 2018.

GETIS, A.; ORD, J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. **Geographical Analysis**, v. 24, n. 3, p. 189–206, 1 jul. 1992.

GETIS, A.; ORD, J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. **Geographical Analysis**, v. 24, n. 3, p. 189–206, 3 set. 2010.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1 jan. 1992.

GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros – MG | Gomes | Ambiente Construído. **Ambiente Construído**, v. 9, n. n.1, p. 73–91, 2009.

Google Earth. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/index.html>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

GSA. **Global Solar Atlas.** Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map?c=36.130329,-6.91665,5&r=ESP>>. Acesso em: 4 jun. 2020.

GSCHREY, B.; ZEIGER, B. Information for technicians and users of refrigeration , air conditioning and heat pump equipment containing fluorinated greenhouse gases. n. January, 2015.

HABEEB, D.; VARGO, J.; STONE, B. Rising heat wave trends in large US cities. **Natural Hazards**, v. 76, n. 3, p. 1651–1665, 2015.

HASANLOU, M.; MOSTOFI, N. **Investigating Urban Heat Island Estimation and Relation between Various Land Cover Indices in Tehran City Using Landsat 8 Imagery.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://sciforum.net/manuscripts/2903/manuscript.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

HIDALGO, J. et al. Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. **Urban Climate**, v. 27, p. 67–89, 2019.

IBGE. **IBGE | Portal do IBGE | IBGE.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 16 maio. 2020a.

IBGE. **IBGE | downloads | geociências.** Disponível em: <https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 13 abr. 2019b.

IBGE. **IBGE | Brasil em Síntese | São Paulo | São José dos Campos | Panorama**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-jose-dos-campos/panorama>>. Acesso em: 4 fev. 2019.

IEA. **Data & Statistics - IEA**. Disponível em: <[https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy consumption&indicator=Coal final consumption by sector](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Coal%20final%20consumption%20by%20sector)>. Acesso em: 21 mar. 2020.

INMETRO. **PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<https://www2.inmetro.gov.br/pbe/edifica.php>>. Acesso em: 8 jun. 2020.

INPE. **BRAMS | Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System**. Disponível em: <<http://brams.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 31 maio. 2020a.

INPE. **FillCell - Lucme** São José dos Campos, SP, Brasil Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, , [s.d.]. Disponível em: <<http://lucme.ccst.inpe.br/fillcell/>>. Acesso em: 22 ago. 2018b

IPPLAN. **Sistematização de informações sobre arborização urbana**. São José dos Campos: [s.n.]. Disponível em: <<http://servicos.sjc.sp.gov.br/downloads/elat667.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres (Tradução da Segunda Edição)**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

JIN, M. et al. A Practical Split-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat-8 Data and a Case Study of an Urban Area in China. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4371–4390, 14 abr. 2015.

JONESCHEIT; LINDA. **Landsat Surface Reflectance Data**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3133/fs20153034>>. Acesso em: 5 fev. 2020.

KIM, H. et al. Impact of future urban growth on regional climate changes in the Seoul Metropolitan Area, Korea. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 355–363, 2016.

KIRTMAN, B. et al. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. **Change, IPCC Climate**, p. 465–570, 2013.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. p. 382, 2014.

LI, Z. L. et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. **Remote Sensing of Environment**, v. 131, p. 14–37, 2013.

LIEPERT, B. G. The physical concept of climate forcing. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 1, n. 6, p. 786–802, 1 nov. 2010.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metr6poles**. S6o Paulo: Hucitec, 1985. v. 16

LORENZZETTI, J. A. **Princ6pios f6sicos de sensoriamento remoto**. 1. ed. S6o Paulo: Blucher, 2015.

LUCENA, A. UMA AN6LISE DE T6CNICAS NOS ESTUDOS DE CLIMA URBANO PARA A REGI6O METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO. **Geo UERJ**, v. 0, n. 34, p. e40954, 15 abr. 2019.

LUCON, O. et al. **Buildings. In: Mitigation. Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Buildings. In: Climate Change**. [s.l.: s.n.]. Dispon6vel em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2018.

MAR6CO, J. **An6lise Estat6stica com Utiliza6o do SPSS**. 3. ed. [s.l.: s.n.].

MASEK, J. G. et al. A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990-2000. **IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS**, v. 3, n. 1, 2006.

MASSON, V. et al. **City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges** *Urban Climate* Elsevier B.V., , 1 mar. 2020.

MASSON, V.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. **Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities**. [s.l.: s.n.].

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996.

MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS, A. **Climate modelling primer**. [s.l.: s.n.].

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. DE. Introdu6o ao processamento de imagem de sensoriamento remoto. **Cnpq/Unb**, p. 266, 2012.

MME. **Procel - Programa Nacional de Conserva6o de Energia El6trica - Minist6rio de Minas e Energia**. Dispon6vel em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/acoes-e-programas/programas/procel-programa-nacional-de-conservacao-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 8 jun. 2020.

MOITA, F. **Energia Solar Passiva**. 2ed. ed. Lisboa: Ed. Argumentum, 2010.

- MOONEN, P. et al. Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. **Frontiers of Architectural Research**, v. 1, n. 3, p. 197–228, 2012.
- MORAES, E. C. DE. Fundamentos de sensoriamento remoto. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência e Tecnologia**, v. Capítulo 1, p. 3–12, 2002.
- MORAN, P. A. P. NOTES ON CONTINUOUS STOCHASTIC PHENOMENA. **Biometrika**, v. 37, n. 1–2, p. 17–23, 1950.
- NARAYANA REDDY, S.; MANIKIAM, B. **Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT data using Emissivity Estimation** *International Journal of Applied Engineering Research*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ripublication.com>>. Acesso em: 13 jun. 2019.
- OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1976.
- OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.
- OKE, T. R. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION INSTRUMENTS AND OBSERVING METHODS REPORT No . 81 INITIAL GUIDANCE TO OBTAIN REPRESENTATIVE METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AT URBAN SITES. **World Meteorological Organization**, n. 81, p. 47, 2006.
- OKE, T. R. et al. **Urban climates**. [s.l.] Cambridge University Press, 2017.
- ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- ONU. **Roteiro para a Localização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | PNUD Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<file:///C:/Users/fabia/Downloads/undp-br-roteiro-localizacao-objetivos-desenvolvimento-2017.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- OSBORNE, J. W.; OVERBAY, A. **The power of outliers (and why researchers should ALWAYS check for them) - Practical Assessment, Research & Evaluation**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.pareonline.net/getvn.asp?v=9&n=6>>. Acesso em: 18 maio. 2019.
- OSMOND, P. et al. **Title Guide to Urban Cooling Strategies**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.lowcarbonlivingcrc.com.au/sites/all/files/publications_file_attachments/rp2024_guide_to_urban_cooling_strategies_2017_web.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2019.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: TBN Gráfica e Editora, 2017.

PITMAN, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 5, p. 479–510, 2003.

PMSJC. **Geoprocessamento - Prefeitura de São José dos Campos**. Disponível em: <<http://www.sjc.sp.gov.br/servicos/urbanismo-e-sustentabilidade/uso-do-solo/geoprocessamento/>>.

PMSJC. **São José 2016 em dados**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://servicos2.sjc.sp.gov.br/media/667370/sjdados_2016.pdf>. Acesso em: 5 set. 2018.

PMSJC. **Lei Complementar 612 2018 de São José dos Campos SPPrefeitura Municipal de São José dos Campos**, 2018. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a2/plano-diretor-sao-jose-dos-campos-sp>>. Acesso em: 9 jun. 2020

PMSJP. **Gestão Urbana SP**. Disponível em: <<https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/noticias/nova-lei-de-zoneamento-aumenta-em-50-as-areas-de-protecao-ambiental/>>. Acesso em: 19 jun. 2020.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p. 295–300, 1 abr. 2005.

PROCEL. **Planejamento e controle ambiental-urbano e a eficiência energética. Guia TécnicoUniversitas: Arquitetura e Comunicação Social**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.fna.org.br/site/uploads/noticias/arquivos/LivroAT-Internet.pdf%0Ahttp://www.publicacoes.uniceub.br/index.php/arqcom/article/view/2559>>.

QI, J.-D. et al. Do grey infrastructures always elevate urban temperature? No, utilizing grey infrastructures to mitigate urban heat island effects. **Sustainable Cities and Society**, v. 46, p. 101392, 1 abr. 2019.

QUAH, A. K. L.; ROTH, M. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. **Atmospheric Environment**, v. 46, p. 92–103, 2012.

REDEMET. **Sistema de Geração e Disponibilização de Informações Climatológicas**. Disponível em: <<http://clima.icea.gov.br/clima/tempMHMS.php>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

RSTUDIO. **Home - RStudio**, 2015. Disponível em: <<https://www.rstudio.com/>>. Acesso em: 22 ago. 2018

SAILOR, D. J. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 189–199, 1 fev. 2011.

SANTAMOURIS, M. et al. PROGRESS IN URBAN GREENERY MITIGATION SCIENCE – ASSESSMENT METHODOLOGIES ADVANCED TECHNOLOGIES AND

IMPACT ON CITIES. **JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT**, v. 24, n. 8, p. 638–671, 21 dez. 2018.

SANTOS, A. R. et al. Spatial and temporal distribution of urban heat islands. **Science of the Total Environment**, v. 605–606, 2017.

SÃO PAULO. **Série Informações Energéticas, 001 Boletim Energético**. São Paulo, SP: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br>>. Acesso em: 24 maio. 2020.

SCHMIDT, F. W.; HENDERSON, R. E.; WOLGEMUTH, C. H. **Introduction to thermal sciences : thermodynamics, fluid dynamics, heat transfer**. [s.l.] Wiley, 1993.

SHAHMOHAMADI, P. et al. The Impact of Anthropogenic Heat on Formation of Urban Heat Island and Energy Consumption Balance. **Urban Studies Research**, v. 2011, p. 1–9, 2011.

SHARMA, A. et al. **Review on thermal energy storage with phase change materials and applications** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, fev. 2009.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. **Journal of Computational Physics**, v. 227, n. 7, p. 3465–3485, 20 mar. 2008.

SOBRINO, J. A. et al. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, v. 46, n. 2, 2008a.

SOBRINO, J. A. et al. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 2, p. 316–327, fev. 2008b.

SOBRINO, J. A.; CASELLES, V.; BECKER, F. Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 343–354, 1 mar. 1990.

SOBRINO, J. A.; RAISSOUNI, N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 2, p. 353–366, jan. 2000.

SOLTANI, A.; SHARIFI, E. Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. **Frontiers of Architectural Research**, v. 6, n. 4, p. 529–538, 1 dez. 2017.

SOUZA, D. O. DE. **Influência da ilha de calor urbana nas cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012.

SOUZA, D. O. DE; ALVALÁ, R. C. DOS S.; NASCIMENTO, M. G. DO. Urbanization effects on the microclimate of Manaus: A modeling study. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 237–248, 2016.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012.

STEWART, I. D.; OKE, T. R.; KRAYENHOFF, E. S. Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 4, p. 1062–1080, 1 mar. 2014.

SZOKOLAY, S. V. Bioclimatic Architecture and Solar Energy. In: [s.l: s.n.]. p. 111–131.

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

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 2, p. 51–63, fev. 2008.

TOBLER, W. R. Cellular geography. **Philosophy in geography**, p. 379–386, 1979.

UN-HABITAT. **URBANIZATION AND DEVELOPMENT Emerging Futures. World cities report 2016**. Naiorobi, Kenia: [s.n.]. Disponível em: <<https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/WCR-2016-WEB.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2020.

UNDESA. **World Urbanization Prospects**. [s.l: s.n.].

UPTON, G. J. G.; COOK, I. (IAN T. . **Understanding statistics**. [s.l.] Oxford University Press, 1996.

USGS. **Landsat Science Products**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-science-products?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 17 dez. 2018.

USGS. **What are the band designations for the Landsat satellites?** Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products>. Acesso em: 5 fev. 2020.

USGS. **EarthExplorer - Home**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 22 ago. 2018a.

USGS. **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. Sioux Fall, South Dakota: [s.n.]. Disponível em: <[128](https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-</p></div><div data-bbox=)

1574_L8_Data_Users_Handbook_v4.0.pdf>. Acesso em: 3 maio. 2019b.

VERBURG, P. H. et al. **A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use** *Ecological Modelling*. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://pdfs.semanticscholar.org/6268/a4f7b9e167bc22cfe1dd9ab6e952bae3e9b7.pdf>>.

Acesso em: 8 nov. 2018.

VERMOTE, E. et al. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 46–56, 1 nov. 2016.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações - 2ª Edição**. 2. ed. Viçosa_Minas Gerais: [s.n.].

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. **Building and Environment**, v. 112, p. 337–350, 2017.

WANG, F. et al. An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4268–4289, 10 abr. 2015.

WATERS, R. et al. **SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land Idaho Implementation Advanced Training and Users Manual List of Symbols**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2018.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 4, p. 335–344, 2009.

WENG, Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 34–49, 2012.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 467–483, 2004.

WUDAPT. **WUDAPT, World Urban Database and Access Portal Tools**. Disponível em: <<http://www.wudapt.org/>>. Acesso em: 1 jun. 2019.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 20 jul. 2006.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583–594, 2003.

APÊNDICE A - PRINCÍPIOS BÁSICOS PARA INTERPRETAÇÕES DE IMAGENS DE SATÉLITES

As imagens dos sensores remotos são obtidas a partir da energia refletida, emitida ou retro espalhada por alvos da superfície terrestre, que são captada por sensores instalados a bordo de plataformas em altitude como aeronaves, satélites, balões ou foguetes. Neste modo de aquisição de dados não há contato físico entre o objeto e o sensor. Os princípios do sensoriamento remoto são estabelecidos a partir da radiometria, técnica que consiste em quantificar a medida da radiação eletromagnética, e engloba o conjunto de princípios e leis que tratam da geração, propagação e detecção da radiação eletromagnética na faixa ótica do espectro eletromagnético, desconsiderando-se o intervalo que corresponde a micro-ondas (LORENZZETTI, 2015).

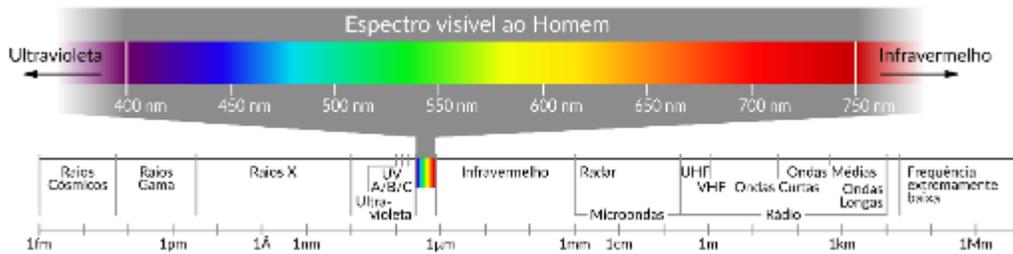
Os componentes das superfícies terrestres interagem de maneira distinta a radiação eletromagnética em função de suas propriedades físicas, químicas e biológicas o que permite a sua identificação (MORAES, 2002). O sensoriamento remoto permite estabelecer uma relação determinística entre a quantidade de energia refletida, emitida e retro espalhada em bandas ou frequências específicas e as características físicas, químicas e biológicas do fenômeno que se está observando (JENSEN, 2009).

Na medição radiométrica o sensor remoto capta a energia eletromagnética proveniente da superfície terrestre, em diferentes intervalos de comprimentos de onda (λ), denominados bandas, regiões ou canais, que são armazenadas em forma de imagens, dígitos ou gráficos (MORAES, 2002). A coleta de dados por sensores remotos pode se dar de forma passiva, quando o sensor capta a energia refletida ou emitida pelo terreno, ou de forma ativa quando o sensor gera energia eletromagnética e depois registra a quantidade fluxo radiante espalhado de volta em direção ao sensor (JENSEN, 2009).

As maiores fontes naturais de radiação eletromagnética, utilizadas para aquisição de dados por sensoriamento remoto são o Sol e a Terra. Para fins de sensoriamento remoto considera-se a radiação eletromagnética proveniente do Sol, a radiação refletida pelas superfícies terrestres no intervalo que corresponde ao espectro solar, e a radiação proveniente da Terra aquela emitida pelos corpos terrestres no intervalo que corresponde ao espectro termal (JENSEN, 2009).

A radiação ou energia proveniente do Sol, cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético (PEREIRA et al., 2017). A radiação solar ou radiação de onda curta que atinge a Terra, é parcialmente absorvida pela atmosfera, consiste na energia eletromagnética especular e difusa, integrada com comprimentos de onda entre 290 e 2500 nanômetros (nm) aproximadamente. Compreende a radiação ultra violeta (6%), com comprimentos de onda entre 290 a 380nm, a radiação visível (46%), com comprimentos de onda entre 380 e 780 nm e a radiação infravermelha com comprimentos de onda entre 780 a 2500nm (43%) (Figura A.1) (CHEREMISINOFF; REGINO, 1978).

Figura A.1 - Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana



Fonte: Pereira e al. (2017).

A radiação proveniente da Terra é emitida com comprimentos de onda na região do infravermelho médio entre 3000 e 5000nm, e infravermelho termal, entre 8000 e 14000nm (JENSEN, 2009).

A qualidade dos dados obtidos por sensores remotos, depende da capacidade do sensor em obter medidas detalhadas da energia eletromagnética, e é dada em função de sua resolução espacial, radiométrica, espectral e temporal (MORAES, 2002).

A resolução espacial é definida a partir do menor elemento não divisível detectado numa imagem, entidade denominada pixel. Nas imagens digitais os pixels são dispostos em linhas e colunas, como uma matriz de números. Os pixels caracterizam-se por ser uma unidade bidimensional, que tem um valor de brilho ou número digital associado (JENSEN, 2009). A resolução espacial das imagens digitais é uma função resultante de fatores como altitude do sensor, dimensão do detector, dimensão do foco e configuração do sistema (WENG, 2012).

A resolução radiométrica define a eficiência do sistema em detectar pequenos sinais denominados valores de brilho ou números digitais (DN), representados em diferentes níveis de cinza (MORAES, 2002). Materiais constituídos por diferentes elementos químicos, átomos e moléculas têm absorções e refletâncias diferentes resultando em diferentes tons de cinza, o que permite a sua identificação. Quanto maior a capacidade do sensor remoto detectar as variações possíveis de valores de brilho, mais precisas serão as medidas de radiação eletromagnética registrada pelo sensor. Os valores de brilho são obtidos através da conversão do sistema analógico-digital, que ocorre a bordo do sistema sensor, criando pixels com valor de brilho entre 8 e 12 bits. Este processo determina o nível de quantização do dado do sensor remoto e define sua resolução radiométrica. Os dados de sensores quantizados para 8 bits têm valores de brilho variam de 0 a 255 (2^8), os quantizados para 10 bits (2^{10}) de 0 a 1023 pixels e assim por diante. A resolução temporal refere-se a repetitividade ou ao intervalo de tempo de aquisição de dados, obtidos pelo sensor remoto, para uma mesma cena (JENSEN, 2009).

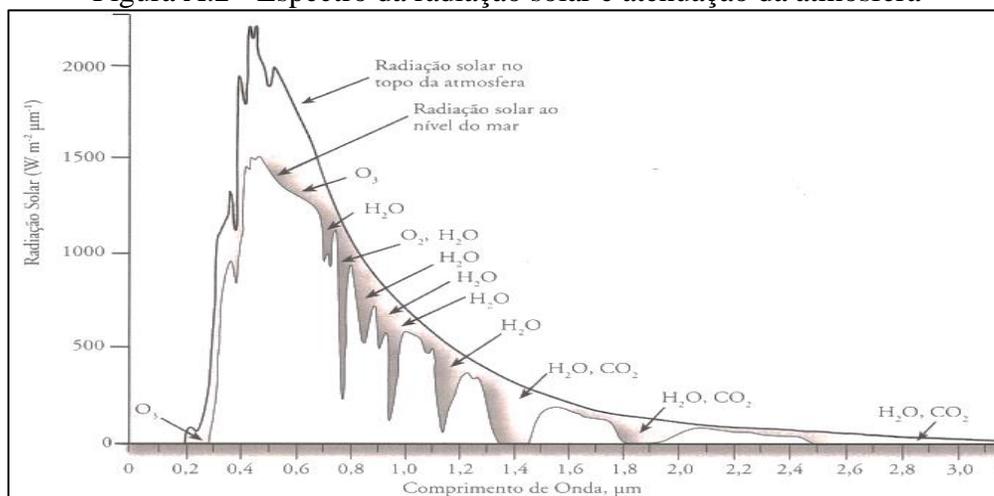
A resolução espectral refere-se à amplitude espectral em que o sensor opera. A maior resolução espectral é dada pelo maior número de medidas ou intervalos de comprimento de onda detectado pelo sensor. O agrupamento dos intervalos de comprimento de onda pelos

sensores remotos, para conformação das imagens e dados espaciais, pode ser chamado de banda, canal ou região (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A.1 Interações Atmosfera e fluxos de energia radiante

Os fluxos de energia radiante que atingem o sensor remoto são influenciados pelas características da atmosfera, que atua como um filtro da radiação solar e altera os fluxos de energia refletidos, transmitidos e emitidos pela superfícies terrestres (JENSEN, 2009). Para alguns comprimentos de onda a atmosfera atua como um filtro para a radiação eletromagnética (Figura A.2). Isso se dá em função dos efeitos de absorção, que consistem no processo pelo qual a radiação eletromagnética (REM) é absorvida e convertida em outras formas de energia. A absorção de alguns comprimentos de onda deve-se principalmente a presença de vapor de água (H_2O), ozônio (O_3) e dióxido de carbono (CO_2)(JENSEN, 2009). As regiões do espectro eletromagnético onde a absorção da radiação é quase nula são denominadas janelas atmosféricas, para estes comprimentos de onda a atmosfera é transparente (MORAES, 2002).

Figura A.2 - Espectro da radiação solar e atenuação da atmosfera

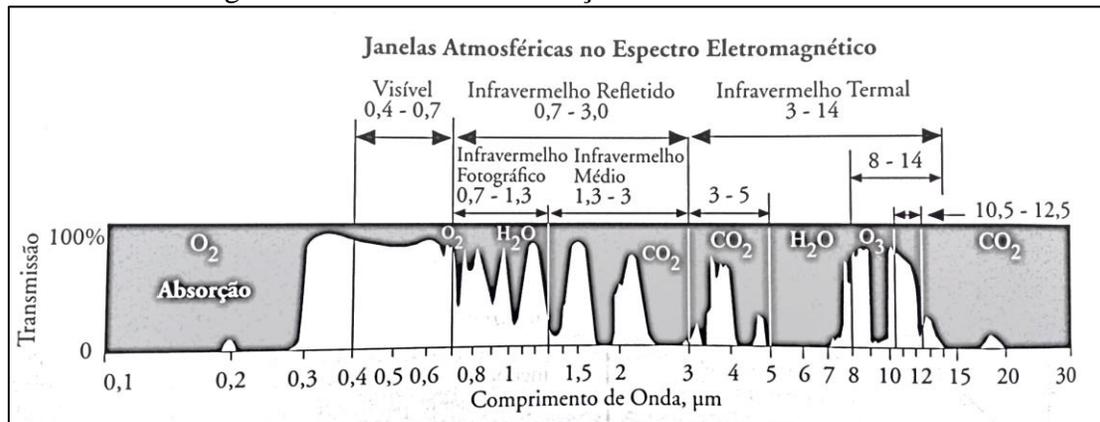


Fonte: Jensen (2009).

A primeira interação entre a radiação solar e a atmosfera, ocorre entre 90 e 150 km acima da superfície terrestre, quando a radiação eletromagnética proveniente do Sol penetra na atmosfera, e os comprimentos de onda menores que $0,28 \mu m$, os Raios X, são absorvidos. Entre 15 e 20 km da superfície, a camada de Ozônio (O_3) com cerca de 30 Km de espessura, atua como filtro das radiações ultravioleta (UV).

A absorção da radiação solar diminui na proporção que aumentam os comprimentos de onda (Figura A.3). A partir dos $0,3 \mu m$ a absorção da radiação UV até a faixa da radiação solar visível, entre $0,4$ e $0,7 \mu m$ é mínima. Já na faixa espectral do infravermelho, pode-se observar intervalos com absorções acentuadas devido ao vapor d'água (H_2O) e ao Dióxido de Carbono (CO_2) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Figura A.3 - Bandas de Absorção e Janelas Atmosféricas



Fonte: Jensen (2009)

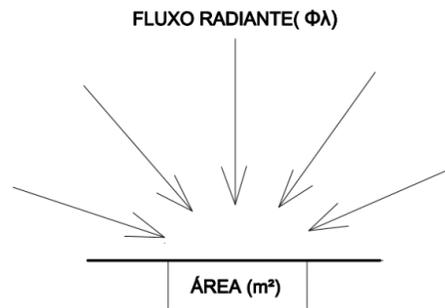
A radiação eletromagnética em comprimentos de onda com fraca absorção pela atmosfera e que atingem os sensores remotos a bordo de satélites e aeronaves, são a base de dados para aferição das características espectrais das superfícies investigadas. Os intervalos de comprimentos de onda, para os quais a atmosfera é transparente, que são mais utilizados em sensoriamento remoto incluem três principais faixas espectrais: 450 a 2500nm (0,45 a 2,5 μm) região do espectro que corresponde à radiação solar, 8000 a 14000nm (8 a 14 μm), que corresponde à região do infravermelho térmal, e (3 a 6 μm) que corresponde à micro-ondas utilizada em sensores ativos (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A.2 Interações Matéria e fluxos de energia radiante

A composição da superfície terrestre é elemento chave para o entendimento do sistema climático global, pois sua morfologia e constituição influenciam a quantidade de energia absorvida, os fluxos de calor (sensível e latente) e turbulências nas camadas mais baixas da atmosfera. Para cada 100 unidades de energia que entram no sistema climático global aproximadamente 46 são absorvidos pela superfície Terrestre e 31 são transformados em calor sensível e latente, responsáveis pelas condições climáticas (PITMAN, 2003).

O fluxo radiante (Φ_λ), medido em watts (W), é a taxa temporal do fluxo de energia em um dado comprimento de onda λ em direção a, para fora de, ou através de uma superfície. A densidade de fluxo de energia radiante incidente (Figura A.4) sobre uma superfície por unidade de área é denominada de irradiância (E_λ), dada em Watts por metro quadrado (W/m^2), e definida como densidade de fluxo radiante incidente na superfície do terreno por unidade de área de superfície (Equação A.1) (JENSEN, 2009).

Figura A.4 - Fluxo de Energia Incidente ou Irradiância (E_{λ})



Fonte: Adaptado de Jensen (2009).

$$E_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A} \quad (\text{A.1})$$

E_{λ} – Irradiância (W/m^2)

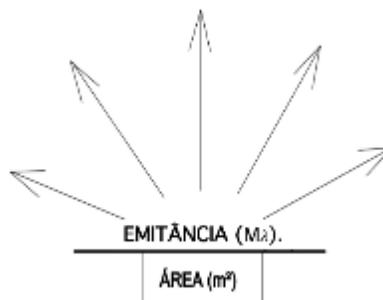
Φ_{λ} – densidade de fluxo radiante incidente na superfície (W)

A – área de superfície (m^2)

A densidade do fluxo de energia incidente sobre uma superfície varia continuamente no espaço e no tempo. Depende da localização geográfica, orientação cardinal, dia do ano, horário e condições atmosféricas. Na escala local, a radiação que atinge uma superfície é afetada por três principais parâmetros: composição da atmosfera, comprimento da trajetória do Sol pela atmosfera e obstruções por sombreamento (BUTERA et al., 2014).

A densidade do fluxo de energia radiante que emerge de uma superfície por unidade de área (Figura A.5) é denominado emitância ou emitância espectral (M_{λ}), dada em watts por metro quadrado (W/m^2) (Equação A.2).

Figura A.5 - Densidade do fluxo de energia radiante, emitância ou emitância espectral (M_{λ})



Fonte: Adaptado de Jensen (2009).

$$M_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A} \quad (\text{A.2})$$

M_{λ} _ densidade de fluxo que emerge da superfície, exitância ou emitância espectral (W/m²)

Φ_{λ} - fluxo de energia que emerge de uma superfície por unidade de área (W)

A – área de superfície (m²)

O conceito de exitância ou emitância espectral (M_{λ}) inicia-se a partir do entendimento de que qualquer material com temperatura acima de zero emite radiação eletromagnética e está amparado nos princípios físicos estabelecidos na Lei de Stefan-Boltzman e Lei de Planck, entre outras. A lei de Stefan-Boltzman explica a emissão de energia por um corpo negro e estabelece que a quantidade de energia emitida por um corpo negro (M_{λ}), medida em W/m², é proporcional a quarta potência de sua temperatura absoluta (T) medida em Kelvin (K), podendo ser descrita pela Equação A.3 (JENSEN, 2009).

$$M_{\lambda} = \sigma T^4 \quad (\text{A.3})$$

M_{λ} _ exitância ou emitância espectral (W/m²)

σ _ constante de Stefan-Boltzman (5,6697 x 10⁻⁸ W/m² K⁻⁴)

T^4 _ temperatura absoluta (K)

Um corpo negro, considerado ideal, absorve toda radiação que sobre ele incide, independente do comprimento de onda ou direção da radiação. Ele emite toda a radiação que absorve. Um corpo real não absorve toda a radiação que sobre ele incide e é denominado corpo cinza, conseqüentemente, emite menos radiação que um corpo negro na mesma temperatura (SCHMIDT; HENDERSON; WOLGEMUTH, 1993).

Para a estimativa da densidade de fluxo radiante ou exitância de objetos do mundo real ou corpos cinza é necessário adaptar a Equação A.4, aplicada originalmente a corpos negros, considerando-se o valor da emissividade (ϵ) dos materiais (Equação 0.1) para estimar o fluxo radiante que emana de um objeto que é captado pelo sensor remoto (JENSEN, 2009).

$$M_{\lambda} = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{A.4})$$

M_{λ} _ exitância ou emitância espectral (W/m²)

σ _ constante de Stefan-Boltzman (5,6697 x 10⁻⁸ W/m² K⁻⁴)

T^4 _ temperatura absoluta (K)

ϵ _ emissividade (adimensional)

Os princípios físicos utilizados para a aquisição de dados por sensores remotos, tomam como base a forma como a energia incidente na superfície terrestre, interage com seus componentes, influenciando os fluxos de energia radiante refletidos, absorvidos e transmitidos. Estes princípios são estabelecidos de acordo com os princípios de conservação de energia, expressos na Primeira Lei da Termodinâmica. Essa lei afirma que a soma algébrica de toda energia que cruzar a fronteira do sistema, deve ser igual à variação na energia do sistema (SCHMIDT; HENDERSON; WOLGEMUTH, 1993).

A quantidade total de fluxo radiante que incide e emerge da superfície, em comprimentos de onda específicos (λ), deve ser avaliada pelo balanço de radiação, que estabelece que o fluxo de radiação incidente (Φ_λ) é igual a soma do fluxo de energia refletido ($\Phi_{\text{refletido } \lambda}$), fluxo de energia absorvido ($\Phi_{\text{absorvido } \lambda}$) e fluxo de energia transmitido pela superfície ($\Phi_{\text{transmitido } \lambda}$) (Equação A.5) (JENSEN, 2009).

$$(\Phi_\lambda) = (\Phi_{\text{refletido } \lambda}) + (\Phi_{\text{absorvido } \lambda}) + (\Phi_{\text{transmitido } \lambda}) \quad (\text{A.5})$$

Φ_λ _ fluxo de radiação incidente na superfície

$\Phi_{\text{refletido } \lambda}$ _ fluxo de radiação refletido pela superfície

$\Phi_{\text{absorvido } \lambda}$ _ fluxo de radiação absorvido pela superfície

$\Phi_{\text{transmitido } \lambda}$ _ _ fluxo de radiação transmitido pela superfície

O fluxo de energia refletido por uma superfície representa a capacidade de um meio direcionar o fluxo ou parte dele para o mesmo hemisfério de onde veio, está associado a refletividade do meio, que determina sua capacidade de redirecionar integralmente ou parcialmente o fluxo para o mesmo hemisfério de onde veio (LORENZZETTI, 2015).

A razão adimensional definida entre o fluxo de energia radiante refletido por uma superfície e o fluxo radiante incidente nela é denominado reflectância hemisférica (ρ_λ) ou albedo (A) (Equação A.6).

$$(\rho_\lambda) = \frac{\Phi_{\text{refletido } \lambda}}{\Phi_\lambda} \quad (\text{A.6})$$

ρ_λ _ reflectância hemisférica ou albedo (A) (adimensional)

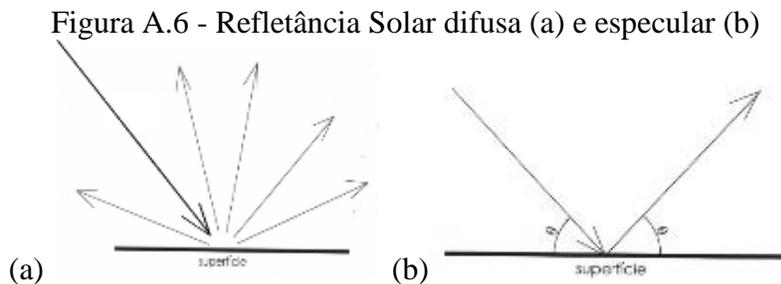
$\Phi_{\text{refletido } \lambda}$ _ fluxo radiante refletido por uma superfície (W)

Φ_λ _ fluxo radiante incidente na superfície (W)

A reflexão ou albedo é a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela. Neste processo a radiação refletida pode ocorrer de forma difusa ou especular

dependendo das características das superfícies. Na forma difusa a radiação refletida se espalha uniformemente em todas as direções (

Figura A.6a). Na forma especular, quando o feixe de luz incide sobre uma superfície, esta funciona como um espelho, sendo o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (Figura A.6b). Na prática, a reflexão de uma superfície não é, nem totalmente especular nem totalmente difusa (DUFFIE; BECKMAN, 2013).



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

Na natureza os alvos se comportam como aproximações de uma superfície lambertiana, sua radiância independe da direção da visada. Uma superfície Lambertiana é considerada totalmente difusa, onde a radiância de um alvo é igual para qualquer direção do espaço enquanto uma superfície especular reflete um feixe de luz em uma só direção (LORENZZETTI, 2015).

O fluxo de energia absorvido por uma superfície está associado a absorvidade do meio, que corresponde a capacidade do meio em remover fótons ou parte da energia associada ao fluxo radiante ($\Phi\lambda$). Neste processo a energia radiante é absorvida pelo meio no qual se propaga e é convertida em outras formas de energia, como por exemplo o calor sendo então emitida num comprimento de onda maior (JENSEN, 2009).

A razão adimensional definida entre o fluxo de energia radiante absorvido por uma superfície e o fluxo radiante incidente nela é denominado absortância hemisférica (α_λ) (Equação A.7).

$$(\alpha_\lambda) = \frac{\Phi \text{ absorvido } \lambda}{\Phi \lambda} \quad (\text{A.7})$$

α_λ - absortância hemisférica (adimensional)

Φ absorvido λ - fluxo radiante absorvido por uma superfície (W)

$\Phi\lambda$ - fluxo radiante incidente na superfície (W)

Os fortes decaimentos de reflectância em determinados comprimentos de onda estão relacionados aos picos de absorção dos materiais (LORENZZETTI, 2015) .

O fluxo de energia transmitido por uma superfície ocorre sempre que há uma diferença de temperatura (ΔT), neste processo a energia radiante é transmitida através de ou por um material (LORENZZETTI, 2015). A razão adimensional definida entre o fluxo de energia radiante transmitido por uma superfície e o fluxo de energia radiante incidente nela é denominado transmitância hemisférica (τ_λ) (Equação A.8).

$$(\tau_\lambda) = \frac{\Phi \text{ transmitido } \lambda}{\Phi \lambda} \quad (\text{A.8})$$

τ_λ – transmitância hemisférica (adimensional)
 Φ transmitido λ – fluxo radiante transmitido por uma superfície (W)
 $\Phi \lambda$ – fluxo radiante incidente na superfície (W)

A transmissão do fluxo de energia pode ocorrer por condução, convecção e radiação. A transferência de energia por condução ocorre quando um corpo (molécula ou átomo) transfere sua energia cinética a outro pela colisão com este. Na convecção, a energia cinética é transferida pela movimentação entre os corpos e na radiação a transferência de energia ocorre através de ondas eletromagnéticas (JENSEN, 2009). As transferências de energia por radiação, ocorrem a nível microscópico em átomos e moléculas, sendo totalmente dependentes da composição química dos materiais (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A transferência de calor por radiação é entendida a partir do modelo corpuscular ou modelo de partícula, estabelecido pelos princípios da Lei de Planck, onde a energia é definida como pacotes discretos, ou quanta, que influenciam o comprimento de onda da radiação liberada, dada a quantidade de trabalho realizada a nível atômico, que ocorre a partir da incidência da radiação eletromagnética na matéria, e induz a movimentação de elétrons, liberando energia radiante e produzindo o efeito denominado fotoelétrico. Os comprimentos de onda da energia produzida são função dos níveis orbitais dos elétrons envolvidos no processo (JENSEN, 2009).

Num sistema termodinâmico, como é o sistema climático terrestre, a energia pode entrar ou deixar o sistema e ser transferida de duas formas: calor e trabalho. Se a transferência de energia ocorrer em função da diferença de temperaturas entre o sistema e a vizinhança, está se dará como calor, caso contrário será transferida como trabalho (SCHMIDT; HENDERSON; WOLGEMUTH, 1993).

A-3 ESTIMATIVA DA VEGETAÇÃO E ÁGUA POR SATÉLITE

As métricas utilizadas para aferir as informações sobre a vegetação e água na superfície terrestre, utilizando imagens de satélites, consistem no uso de índices, onde as informações

são obtidas a partir de medidas radiométricas adimensionais estabelecidas a partir do comportamento espectral de cada elemento.

Os índices de vegetação fazem uso da relação inversa entre as reflectâncias no vermelho e no infravermelho próximo associando-as a vegetação verde e sadia. Esses índices são consolidados a partir de operações algébricas que envolvem faixas específicas de refletância que permitem determinar a cobertura vegetal e sua densidade. Existem muitos índices de vegetação com conteúdo redundante em termos de conteúdo de informação, devendo-se escolhê-los de acordo com os objetivos e propósitos propostos em cada pesquisa (JENSEN, 2009).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é o índice de vegetação mais conhecido e utilizado para fins de monitoramento da vegetação, foi desenvolvido na década de 70, a partir do primeiro índice de vegetação utilizado para fins de aferição de vegetação por sensoriamento remoto, denominado método da Razão Simples (SR), desenvolvido na década de 60. O NDVI permite monitorar mudanças na atividade da vegetação e reduzir ruídos presentes nas múltiplas bandas de imagens. Este índice contempla a razão entre as diferenças das refletividades nas bandas no infravermelho próximo (ρ_{nir}) e no vermelho (ρ_{red}) e pelas somas dessas mesmas refletividades

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (A.9)$$

(Equação A.9). O NDVI é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação cujos valores variam entre 1 e -1 (BORATO, GOMIDE, 2013). As áreas alagadas ou com mais água apresentam resultados negativos, enquanto as áreas de vegetação mais intensa valores próximos a 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (A.9)$$

NDVI _ Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

ρ_{nir} _ refletância no infravermelho próximo

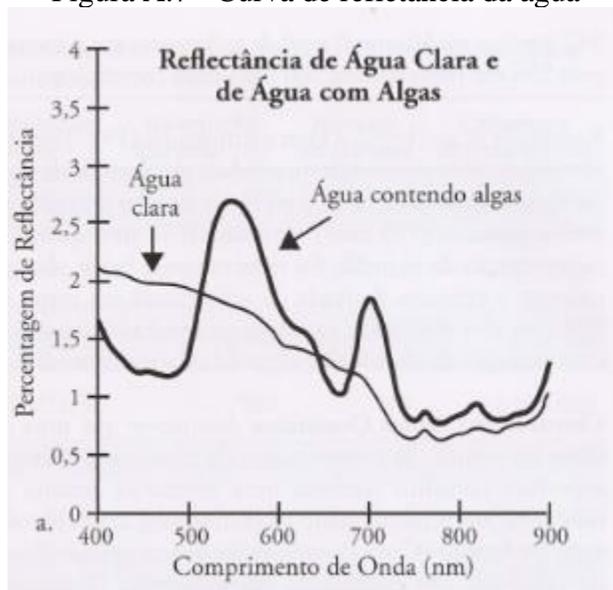
ρ_{red} _ refletância no vermelho

Embora o NDVI seja amplamente utilizado em diversas aplicações e pesquisas multidisciplinares, o mesmo não fornece informações sobre a quantidade de vegetação por pixel, sendo a fração de cobertura de vegetação (FCV) ou percentual de vegetação (P_v) o indicador de proporção vegetal por pixel. Estudos estatísticos e análises através de gráficos de dispersão, que avaliaram a efetividade do uso do NDVI em relação a fração de vegetação por pixel (FCV ou P_v), como indicador de padrões térmicos urbanos, verificaram que FCV apresentou uma maior correlação negativa com a temperatura das superfícies do que o NDVI,

mostrando-se um indicador mais adequado para avaliar a influência da vegetação na temperatura das superfícies (WENG, 2009).

As métricas utilizadas para aferir informações sobre a água na superfície, por meio de imagens de satélites, são feitas com base no comportamento termo físico da água, que remete a sua alta capacidade de absorção de radiação solar no intervalo visível e no infravermelho. A capacidade de absorção de radiação solar pelos corpos d'água varia em função das concentrações e tipos de sedimentos em suspensão como minerais e matéria orgânica (LORENZZETTI, 2015). A imagem da Figura A.7 mostra a curva de refletância espectral da água clara e da água contendo algas.

Figura A.7 - Curva de refletância da água



Fonte: Jensen (2009).

Os índices utilizados para avaliar o conteúdo de água na superfície são estimados considerando-se a baixa capacidade da água de refletir comprimentos de onda no infravermelho próximo (NIR) e no intervalo visível. Dentre os índices mais utilizados para monitorar a água em superfícies pode-se citar o índice de água por diferença normalizada (NDWI) (MCFEETERS, 1996) e o índice de umidade por diferença normalizada (NDMI)(GAO, 1996).

O NDWI é mais indicado para identificar corpos de água, enquanto o NDMI é utilizado para averiguar o conteúdo de água em áreas verdes, sendo também utilizado para acompanhar as mudanças da biomassa e estresses de umidade nas plantas, fornecendo informações sobre o conteúdo de umidade interna na vegetação. Entre as aplicações do NDMI estão a identificação de áreas áridas.

O NDWI é calculado a partir da refletância dos comprimentos de onda na cor verde e baixa refletância ao infravermelho próximo (NIR) (MCFEETERS, 1996; XU, 2006). O NDMI por sua vez, é estimado a partir das bandas do infravermelho próximo ao infravermelho médio, sendo esta relação descrita na Equação A.10 (JENSEN, 2009):

$$\text{NDMI} = \frac{\text{NIR (BANDA4)} - \text{MID IR (BANDA5)}}{\text{NIR (BANDA4)} + \text{MID IR (BANDA5)}} \quad (\text{A.10})$$

A.4 Temperatura das superfícies

A temperatura das superfícies (TS) é um dos parâmetros mais importantes para entender o balanço energético em escala local e global. Influencia os fluxos de ar nas camadas mais baixas da atmosfera. Ao mesmo tempo é o elemento que determina o balanço de energia da superfície, afeta o clima interno das edificações e o clima urbano. O sensoriamento remoto é uma importante ferramenta para a observação da temperatura superficial da Terra. A TS varia em função do balanço energético das superfícies, e permite integrar os fenômenos radiativos em função das propriedades termodinâmicas do meio. Tais propriedades incluem a relação entre a radiação térmica e a emissividade das superfícies, a radiação vinda do Sol e a espalhada pela atmosfera, os efeitos da atmosfera próxima e de turbulências, contemplando a variabilidade do campo térmico nas áreas urbanas (VOOGT; OKE, 2003).

A estimativa da temperatura de um alvo na superfície terrestre por sensoriamento remoto tem seus conceitos amparados na lei de Planck. Sua estimativa pode ser realizada a partir da observação da radiância no intervalo do infravermelho termal (8 a 14 μm), transformação desta informação em temperatura radiante ou temperatura de brilho (TB) e incorporação dos efeitos da emissividade das superfícies (JENSEN, 2009).

O conceito de estimativa de TS, a partir de informações de sensores remotos, considera que todos os objetos da Terra irradiam radiação infravermelha e esta radiação é proporcional a temperatura dos objetos. Todos os objetos com temperatura superior a zero absoluto apresentam movimento aleatório de partículas e emitem energia radiante. O movimento aleatório de partículas é denominado calor cinético, calor interno, real ou verdadeiro. A colisão entre as partículas em movimento muda o estado de energia da matéria que passa a emitir radiação eletromagnética. A concentração de calor cinético nos objetos é denominada temperatura cinética verdadeira (T_{kim}). A radiação eletromagnética que deixa o objeto é denominada emitância ou emitância espectral ($M\lambda$), conforme descrito anteriormente, já a concentração deste fluxo radiante é denominado temperatura radiante (T_{rad}) ou temperatura de brilho (TB) (JENSEN, 2009).

A estimativa da temperatura das superfícies (TS), por satélites, inicia-se com a conversão dos números digitais (DN) detectados pelo sensor a bordo do satélite em radiância (L). O sensor remoto de infravermelho a bordo dos satélites registra a radiância proveniente da superfície terrestre, no intervalo do Infravermelho termal (8 a 14 μm). A radiância (L_λ) detectada pelo

satélite é o resultado da converção dos níveis de cinza ou números digitais que variam de 0 a 255 (Equação A.11) (CHUVIECO; HUETE, 2010)(JENSEN, 2009).

$$L_{\lambda} = L_{\lambda\min} + [L_{\lambda\max} - L_{\lambda\min}] Q_{ND}/Q_{\max} \quad (A.11)$$

L_{λ} – Radiância captada pelo sensor a bordo do satélite

$L_{\lambda\min}$ – Radiância espectral mínima associada ao Nível de cinza mínimo

$L_{\lambda\max}$ – Radiância espectral máxima associada ao Nível de cinza máximo

Q_{ND} – Nível de cinza de cada pixel

Q_{\max} – Nível de cinza máximo (255 para 8bits)

A radiância (L_{λ}) captada pelos sensores a bordo dos satélites considera a radiação emitida pela superfície e atenuada pela atmosfera, radiação emitida pela atmosfera e a refração da radiação solar na atmosfera para o intervalo do Infravermelho termal. Assumindo-se uma atmosfera sem nuvens e em equilíbrio termodinâmico, a radiância recebida pelo sensor a bordo do satélite (L_{λ}), no topo da atmosfera, no intervalo do infravermelho termal, pode ser dada pela equação de transferência radiativa (Equação A.12) (LI et al., 2013).

$$L_{\lambda}(\theta, \varphi) = L_s(\theta, \varphi)\tau_{\lambda}(\theta, \varphi) + Lat_{\lambda\uparrow}(\theta, \varphi) + Ls_{\lambda\uparrow}(\theta, \varphi) \quad (A.12)$$

Radiância proveniente da superfície atenuada pela Atmosfera (1)	Radiância Atmosférica (2)	Espalhamento Atmosférico (3)
--	---------------------------------	------------------------------------

L_{λ} – Radiância espectral infravermelha recebida pelo sensor a bordo do satélite

L_s – Radiância observada no intervalo de comprimento de onda λ na superfície terrestre

τ_{λ} – Transmitância da atmosfera para o intervalo de comprimento de onda λ

$Ls\lambda\tau_{\lambda\uparrow}$ – Termo que representa a radiância térmica observada na superfície e atenuada pela atmosfera (1)

$Lat_{\lambda\uparrow}$ – Termo que representa a radiância térmica que ascende da atmosfera (2)

$Lsl_{\lambda\uparrow}$ – Termo que representa a radiância térmica ascendente dada em função da refração da radiação solar difusa na atmosfera (3)

θ – ângulo zenital

φ – ângulo azimutal

Para se obter a temperatura de uma superfície (TS) através de dados captados por sensores remotos, é necessário primeiro converter os valores de radiância no topo da atmosfera (L_{λ}) em temperatura de brilho (TB), quando assume-se que a emissividade da superfície é igual a de um corpo negro ($\epsilon=1$) (Equação A.13).

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (A.13)$$

TB _ Temperatura de brilho (K)
 K1 _ Constante de calibração 1 (definida a partir do satélite)
 K2 _ Constante de calibração 2 (definida a partir do satélite)
 L λ _ Radiância espectral infravermelha recebida pelo sensor a bordo do satélite
 Ln _ Logaritmo natural

Para se converter a temperatura de brilho no topo da atmosfera (TB) em temperatura da superfície (TS) deve-se incorporar as correções relativas à emissividade das superfícies, considerando-se que os componentes da superfície terrestre são considerados corpos cinza, e possuem valores de emissividade entre zero e um ($0 < \epsilon < 1$) (LI et al., 2013).

A TB de um corpo cinza está relacionada à sua emissividade e temperatura cinética verdadeira (T_{kim}) ou temperatura real, podendo esta relação ser expressa pela Equação A. 14, que considera o efeito da emissividade e temperatura cinética para então obter a temperatura radiante dos alvos de interesse (WENG, 2009).

$$TB = \epsilon^{1/4} T_{kim} \quad (A.14)$$

TB_ Temperatura radiante ou temperatura de brilho de uma superfície ou alvo
 T_{kim} _ Temperatura cinética verdadeira ou temperatura real
 ϵ _ emissividade

Aplicando o conceito acima descrito, que considera os valores de emissividade da superfície terrestre, é possível estimar a temperatura na superfície (TS) (Equação A.15) (ARTIS; CARNAHAN, 1982), onde a estimativa da TS é realizada considerando-se a superfície Lambertiana com emissividade conhecida e desconsiderando-se os efeitos atmosféricos que devem ser estimados separadamente, pois podem afetar a quantidade de radiação espectral proveniente da superfície captada pelo sensor no topo da atmosfera (DASH et al., 2002).

$$TS = \frac{TB}{1 + \left(\frac{\lambda * TB}{\rho}\right) * \ln \epsilon} \quad (A.15)$$

TS _ Temperatura da superfície (K)
 TB _ Temperatura de Brilho (K)
 λ _ comprimento de onda emitido (11,50 μ m)
 $\rho = 1,438 * 10^{-2} \text{ m K}$,
 Ln _ Logaritmo natural
 ϵ _ emissividade

O valor de ρ corresponde a $(h * c/\sigma)$, onde:
h _ constante de Planck ($6,26 \times 10^{-34}$ J s)
c _ velocidade da luz ($2,998 \times 10^8$ m⁻¹)
 σ _ constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

Por convenção tanto a radiância medida no topo da atmosfera (L_λ), quanto a radiância medida na superfície (L_s) são denominadas temperatura de brilho (TB) (LI et al., 2013)(CHUVIECO; HUETE, 2010).

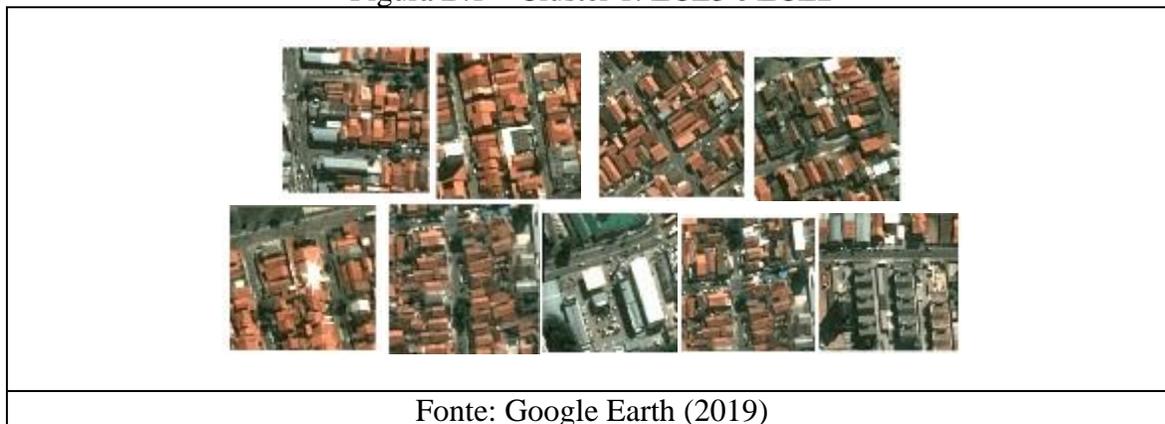
APÊNDICE B – AMOSTRAS PARA CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS

LOCAIS

A identificação das zonas climáticas locais (ZCLs), associadas a cada cluster de TS, foi feita com base em amostras, que foram selecionadas a partir do mapa de clusters de TS (Figura 4.47). O processo de classificação foi feito com base em amostras e em levantamentos realizados utilizando-se a ferramenta “*Street View*” do Google Earth (“Google Earth”, 2019). As amostras utilizadas para a classificação, consistiram em áreas com dimensão de 240 x 240m, que correspondem a união de 4 células contíguas de 60x60metros. Esta dimensão foi adotada de modo a atender a unidade de escala definida para as ZCLs que é a escala local. As amostras que seguem são ilustrativas (Figura B.1 a Figura B.9).

B.1 Amostras do Cluster 1 (CL1)

Figura B.1 – Cluster 1: ZCL3 e ZCL2



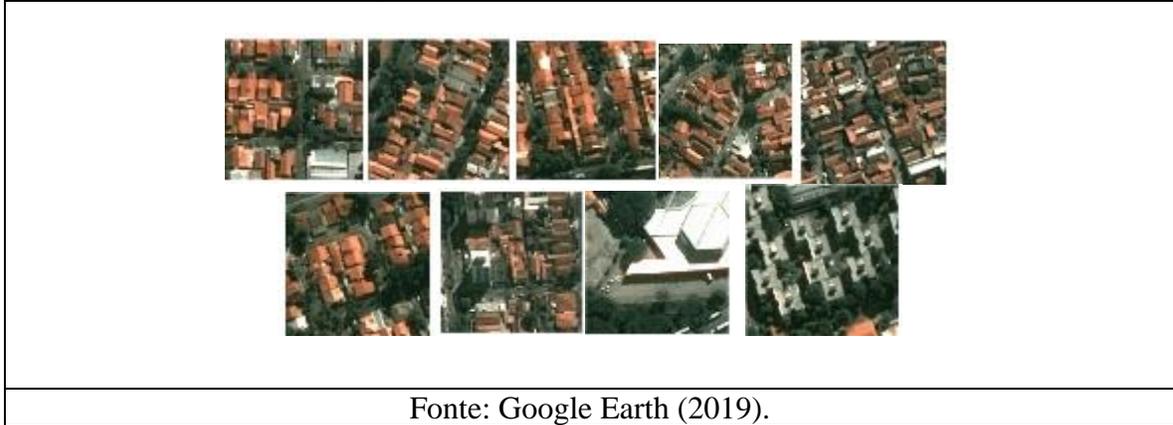
B.2 Amostras do Cluster 2 (CL2)

Figura B.2 – Cluster 2: ZCL3 e ZCL2



B.3 Amostras do Cluster 3 (CL3)

Figura B.3: Cluster 3: ZCL3 e ZCL2



B.4 Amostras do Cluster 4 (CL4)

Figura B.4: Cluster 4: ZCL3 e ZCL2



B.5 Amostras do Cluster 5 (CL5)

Figura B.5: Cluster 5: ZCL9_D



B.6 Amostras do Cluster 6 (CL6)

Figura B.6: Cluster 6 (tipo 1): ZCL8 e ZCLE

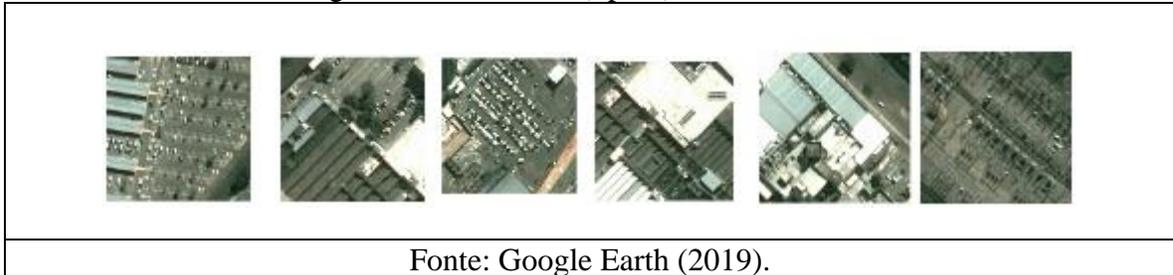
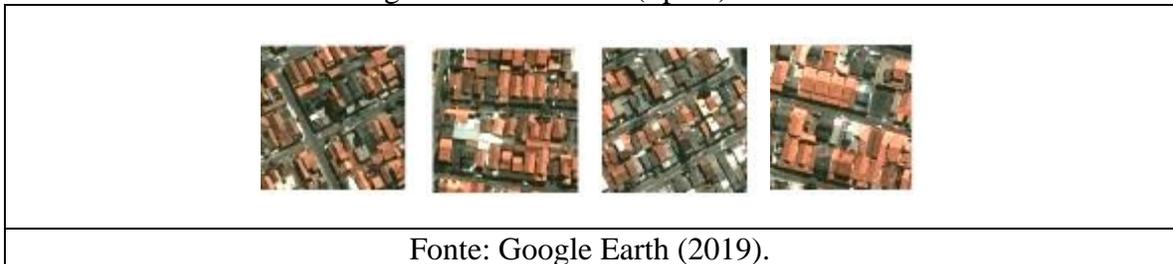
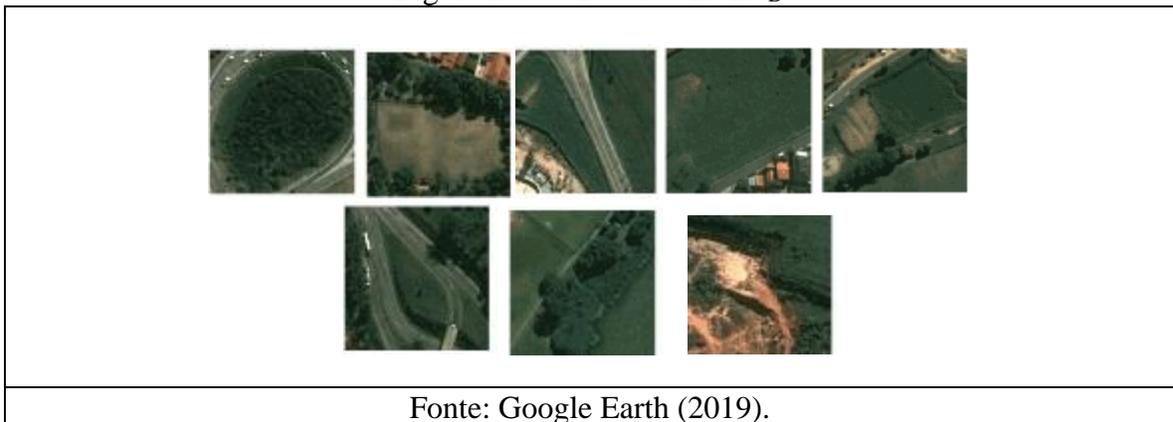


Figura B.7: Cluster 6 (tipo 2): ZCL3



B.7 Amostras do Cluster 7 (CL7)

Figura B.8 - Cluster 7: ZCL9_D



B. 8 Amostras do Cluster 8 (CL8)

Figura B.9 – Tipo 1: ZCL4



Figura B.10 – Tipo 2: ZCL6 e ZCLB



B.9 Amostras do Cluster 9 (CL9)

Figura B.11 - ZCLA e B

