

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

AUGUSTO CEZAR LIMA DO NASCIMENTO

Análise metodológica da estimativa da temperatura: correlação entre
temperatura de superfície e temperatura do ar

São Paulo
2020

AUGUSTO CEZAR LIMA DO NASCIMENTO

Análise metodológica da estimativa da temperatura: correlação entre
temperatura de superfície e temperatura do ar

Dissertação apresentada ao
Departamento de Geografia da Faculdade de
Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da
Universidade de São Paulo, para obtenção do
título de Bacharel em Geografia.

São Paulo

2020

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

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

N241a Nascimento, Augusto
Análise metodológica da estimativa da temperatura:
correlação entre temperatura de superfície e
temperatura do ar / Augusto Nascimento ; orientador
Emerson Galvani. - São Paulo, 2020.
78 f.

TGI (Trabalho de Graduação Individual)- Faculdade
de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da
Universidade de São Paulo. Departamento de
Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. Climatologia estatística. 2. Sensoriamento
remoto. 3. Ilha de calor urbano. 4. Geoestatística.
5. Geoprocessamento. I. Galvani, Emerson, orient.
II. Título.

NASCIMENTO, A.C.L do. **Análise metodológica da estimativa da temperatura:** correlação entre temperatura de superfície e temperatura do ar. Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Profª. Drª. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

RESUMO

NASCIMENTO, A.C.L. do. **Análise metodológica da estimativa da temperatura:** correlação entre temperatura de superfície e temperatura do ar. 2020. 78 f. Dissertação (Bacharel) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

A ausência ou reduzida rede de observação de superfície por meios de estações meteorológicas – automáticas ou convencionais –, a falta de profissionais habilitados, a baixa abrangência espacial dessas medidas, a comunicação e compartilhamento de dados ineficientes e as dificuldades de instalação e monitoramento das estações existentes, traz a necessidade da adoção de modelos, equações e ferramentas que permitam a modelagem espacial e estimação de dados de temperatura do ar. Desta forma, a correlação entre temperatura de superfície terrestre (TST) e temperatura do ar (TAR) auxilia no entendimento dos processos que ocorrem na superfície terrestre, especialmente em processos relacionais a urbanização. Desta forma, validar-se-á a eficácia das variáveis métodos e equações em sensoriamento remoto de correção atmosférica, de classificação de ortofotografias a partir da emissividade e de interpolação espacial de dados de temperatura da superfície terrestre aplicadas ao satélite *Landsat-8* à correlação dos valores de temperatura do ar medidos pelas estações meteorológicas do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da cidade de São Paulo e da espacialização destes valores partir do método geoestatístico de CoKrigagem para o município de São Paulo, com o auxílio de dados de umidade relativa do ar, precipitação e altitude. A análise metodológica será realizada de acordo com as variações espaciais das categorias de uso e ocupação do solo, das categorias de clima urbano estabelecidos pelo atlas ambiental do município de São Paulo e sazonais da normal climatológica estabelecida através das medições da Estação Meteorológica do Mirante de Santana entre o período de 1961 a 1990, as quais identificou a existência de dois períodos ou estações bem definidas, uma quente e chuvosa de outubro a março (primavera-verão) e outra fria e relativamente mais seca, de abril a setembro (outono-inverno). Assim, em um cenário de

mudanças ambientais e crise hídrica que se apresenta nos últimos anos, evidenciado na distribuição irregular de chuvas, aumento do consumo de água em diversas atividades, aumento das temperaturas extremas e redução no nível de água dos reservatórios, tal projeto visa quantificar a eficiência e aplicabilidade dos instrumentos, métodos e ferramentas de sensoriamento remoto ao monitoramento climático para que se possa investigar as possíveis causas das crises climáticas, bem como prever cenários futuros e simular cenários atuais.

Palavras-chave: Climatologia estatística. Sensoriamento Remoto. Ilha de Calor Urbano. Geoestatística. Geoprocessamento. Cokrigagem.

ABSTRACT

NASCIMENTO, A.C.L. do. **Methodological analysis of temperature estimation:** correlation between land surface temperature and air temperature. 2020. 78 f. Dissertação (Bacharel) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

The absence or reduced network of surface observation by meteorological stations - automatic or conventional -, the lack of qualified professionals, the low spatial coverage of these data, the inefficient communication and data sharing and the difficulties of installing and monitoring existing stations, brings the need to adopt models, equations and tools that allow spatial modeling and estimation of climate data. Therefore, the correlation between land surface temperature (LST) and air temperature helps to understand the processes that occur on the land surface, especially in processes related to urbanization. Then, the effectiveness of methods and equations in remote sensing of atmospheric correction, classification of orthophotographs from emissivity and spatial interpolation of land surface temperature data applied to the Landsat-8 satellite will be validated in comparison to the air temperature values measured by the weather stations of the Climate Emergency Management Center of the city of São Paulo and the spatialization of these values using the CoKrigagem geostatistical method in the municipality of São Paulo, using other variables as relative air humidity, precipitation and altitude. The methodological analysis will be performed according to the land use and occupation classification, the urban climate categories established by the environmental atlas of the municipality of São Paulo and the term climate normal established through the measurements of the Meteorological Station of Mirante de Santana between 1961 to 1990, which identified the existence of two well-defined periods, one hot and rainy from October to March (spring-summer) and the other cold and relatively drier, from April to September (autumn-winter). Thus, in a scenario of environmental changes and water crisis that has appeared in recent years, evidenced by the irregular distribution of rainfall, increased water consumption in various activities, increased extreme temperatures and reduced water levels in the reservoirs, this

project aims to quantify the efficiency and applicability of remote sensing instruments, methods and tools to climate monitoring, being able to investigate the possible causes of climate crises, as well as predict future scenarios and simulate current scenarios.

Keywords: Statistical climatology. Remote sensing. Urban Heat Island. Geostatistics. Geoprocessing. Cokrigagem.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO.....	2
3 JUSTIFICATIVA	3
4 REVISÃO TEÓRICA.....	5
5 ÁREA DE ESTUDO	10
5.1 LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO METROPOLITANO	10
5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS.....	12
5.3 CONTEXTO HIDROGRÁFICO	13
5.4 ECOSSISTEMA E COBERTURA VEGETAL	14
5.5 ASPECTOS CLIMÁTICOS	15
6 PROCEDIMENTOS METOLÓGICOS E TÉCNICOS	20
6.1 AQUISIÇÃO DE CENAS	20
6.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	22
6.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO SOLO	24
6.4 ANÁLISE CORRELATIVA ENTRE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E DO AR	28
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
7.1 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	31
7.2 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E TEMPERATURA DO AR	35
7.3 MODELAGEM ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR: COKRIGAGEM	43
8 CONCLUSÕES	47

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXO A – Cenas adquiridas do satélite Landsat-8	54
.....	58
ANEXO B – Mapas de Temperatura da Superfície Terrestre de 1999 e 2000	62
ANEXO C – Fotografias de Campo das Estações Meteorológicas do CGE.....	64

1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto pode ser entendido, segundo Novo (1995), como “a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra e as suas mais diversas manifestações”. Unificado a uma rede de *softwares* e *peopleware*, constitui-se como uma importante ferramenta para a análise e disponibilização de informação com referência geográfica. Tal geotecnologia vem sendo cada vez mais utilizada na tomada de decisões de diversas áreas – gestão municipal, meio ambiente, agronegócio, telecomunicações, etc. – alterando a nossa relação com o meio e, por muitas vezes, conduzindo modificações efetivas no espaço.

A climatologia, com destaque à climatologia geográfica, vem, nas últimas décadas, beneficiando-se com o aperfeiçoamento dos *hardwares*, *softwares* e técnicas atreladas ao sensoriamento remoto e ao Sistema de Informação Geográfica (SIG): aumento de velocidade na coleta e no processamento dos dados, maior amplitude da cobertura de fenômenos e atributos climáticos, incremento na capacidade de seletividade dos dados, etc. A Temperatura de Superfície Terrestre (TST), “resultante de processos de balanço de energia que incorporam os efeitos das propriedades radiativas e termodinâmicas da superfície, emissividade, contribuição da radiação solar e atmosférica incidentes, etc” (OLIVEIRA; TEIXEIRA JUNIOR, 2017), obtida através da captura da emitância dos materiais da superfície terrestre por sensores termais, aliada a modelos matemáticos e métodos de classificação, por exemplo, resulta não apenas em cenas térmicas da superfície da Terra, mas em alternativas viáveis na disponibilização de dados e mapeamentos climáticos em regiões que não apresentam estações meteorológicas, tanto pela abrangência do território quanto pela falta de profissionais habilitados.

Remover efeitos atmosféricos na região do termal é etapa necessária para o uso da banda termal do Landsat-8, isto deve-se as partículas presentes na atmosfera – aerossóis, poeiras, partículas de água em suspensão, moléculas

de diferentes fases – interagirem com a radiação eletromagnética, espalhando-a ou absorvendo-a, e interferem na radiação que chega ao sensor ou aos alvos (SOARES et. al., 2015).

O método de interpolação de dados espaciais de temperatura do ar, isto é, “o processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos [podendo] estimar a temperatura em locais sem dados registrados usando temperaturas conhecidas registradas em estações meteorológicas próximas” (DOCUMENTAÇÃO QGIS2.8, 2015), utilizado foi a CoKrigagem, uma vez sendo o melhor método de regressão usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados em áreas com maior quantidade de estações meteorológicas e de temperatura instantânea. Por fim, a avaliação da correlação entre o dado estimado por sensoriamento remoto e o dado medido por estações meteorológicas será a partir da validação cruzada, calculando-se o erro quadrático médio (EQM) e a raiz do erro quadrático médio (REQM), como orientado pelo mesmo trabalho.

Estudos de estimação são de extrema importância ao monitoramento climático, principalmente em áreas de grandes extensões, pois as estações meteorológicas recolhem dados pontuais, podem apresentar erro humano e, além disso, também são negativamente afetadas por condições externas advindas do método de instalação e seu posicionamento, em São Paulo, por exemplo, o maior centro urbano do Brasil, só há uma estação meteorológica que segue todas as especificações exigidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Desta forma, analisar outras formas de captação de dados climáticos, como ortofotografias, e métodos de modelagem espacial de dados climáticos permite monitorar o clima do território como um todo.

2 OBJETIVO

O projeto de pesquisa visa identificar a correlação presente entre a temperatura superficial terrestre, obtida a partir de sensoriamento remoto com a utilização de bandas termais advindas do satélite *Landsat-8*, e a temperatura do ar obtida através das estações meteorológicas do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE) localizadas na cidade

de São Paulo, demonstrando, ainda, as relações presentes com as variações espaciais das categorias de uso e ocupação do solo e variação da normal climatológica estipulada em duas estações, seca (outono-inverno) e chuvosa (primavera-verão).

3 JUSTIFICATIVA

As geotecnologias, isto é, “conjunto de tecnologias utilizadas para realizar a coleta, o processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica de uma determinada localidade” (SANTIAGO&CINTRA, 2020), são fundamentais à investigação geográfica aplicada a climatologia, principalmente no atual cenário de mudanças climáticas, crises ambientais e desastres naturais, onde permite a investigação de seus componentes, como periodicidade e sazonalidade das chuvas, aumento e redução da temperatura, porcentagem de poluentes no ar, etc de forma a averiguar seus efeitos e causas para simular cenários atuais e futuros.

A ausência ou reduzida rede de observação de superfície por meios de estações meteorológicas – automáticas ou convencionais – além da baixa abrangência espacial dessas medidas, permite à correlação entre TST e Tar auxiliar no entendimento dos processos que ocorrem na superfície terrestre, especialmente em processos relacionais a urbanização.

Validar-se-á a eficácia das variáveis método de correção atmosférica e método de interpolação para a espacialização de dados aplicadas ao satélite Landsat-8 à correlação entre os valores estimados pelas cenas digitais obtidas pelo sensoriamento remoto e os valores medidos pelas estações meteorológicas da CGE na cidade de São Paulo de acordo com variações espaciais das categorias de uso e ocupação do solo e sazonal da normal climatológica – seca (outono-inverno) e chuvosa (primavera-verão).

Assim, tal projeto nasce como forma de analisar a influência que os processos de correção atmosférica pela emissividade e que os modelos matemáticos de modelagem espacial geram nos dados estimados de TST, bem como indicar a relação entre as classes de uso e cobertura do solo e a sazonalidade com a variação da correlação dos resultados entre tais classes e

períodos, para que se possa posteriormente aplicar, simular e prever processos e efeitos das mudanças mesoclimáticas em áreas urbanas com déficit de monitoramento climático.

Um monitoramento climático eficiente é de suma importância estratégica ao país e provoca um grande impacto social, uma vez sendo a forma de prever e propor soluções às crises energéticas e de abastecimento que assolam o país historicamente, para que se possa encontrar padrões e linearidades na aparente instabilidade climática. Em países como os Estados Unidos, por exemplo o gabinete presidencial possui um núcleo exclusivo para abastecê-lo com informações do tempo; isso é comum, também, em países que sofrem com temperaturas baixíssimas, tornados e outros desastres naturais.

No caso brasileiro, as dificuldades vão além da instalação das estações meteorológicas¹, mas também a falta de articulação entre as mesmas, uma vez que em alguns estados brasileiros, vários órgãos e instituições privadas coletam dados, mas sem um banco de informações em comum para acesso; procedimento de coleta ineficaz em propriedades rurais, uma vez sendo necessário coleta de informações diárias dos aparelhos caso sejam convencionais e da manutenção dos mesmos; dificuldade de aquisição de estações meteorológicas automáticas.

Parafraseando Agopyan e John (2011), a questão da adaptação do país ao clima seguramente requer tempo, recursos financeiros e materiais de grande monta, tornando urgente a realização de estudos que possam contribuir para processos de decisão dos administradores em geral e orientar a sociedade quanto aos riscos associados aos problemas socioambientais. O sensoriamento remoto vem de forma a contribuir à fonte de dados, uma vez há uma série histórica de ortofotografias que podem ser utilizadas, inclusive de tecnologia

¹ Necessitam de um sítio apropriado para a instalação com local plano, longe de instalações elétrica que podem produzir interferências eletromagnéticas e longe de obstáculos que possam interferir na transmissão de dados; a distância recomendada de obstáculos é de pelo menos 10 vezes a altura deste, ou seja, na hipótese de haver uma árvore com altura de 10 metros nas proximidades, a estação meteorológica deverá ser montada a uma distância de 100 metros ou superior a este obstáculo; é necessário um espaço de 100 metros quadrados para sua instalação, com solo coberto por grama ou vegetação local de baixo porte, com acesso restrito a esta área sendo cercada com alambrado na altura máxima de 1,5 m e único acesso à área pela face Sul; e, após os procedimentos anteriores serem realizados, durante a instalação e fixação da estação meteorológica, deve-se identificar e marcar a direção Norte (usar sempre o Norte Verdadeiro – Geográfico).

brasileira com o satélite CBERS e à coleta de dados, uma vez que os satélites, normalmente, possuem rotas espaciais e resolução temporal, ou até mesmo sendo possível agendar dias e horários. As técnicas de modelagem geoespacial vem, da mesma forma, a contribuir no monitoramento climático a partir da estimação dos dados pontuais das estações meteorológicas já existentes, permitindo um melhor uso das mesmas.

Desta forma, identificar as melhores ferramentas, metodologias de processamento de dados e suas aplicabilidades em diferentes contextos geográficos vem a introduzir outros meios, economicamente e tecnicamente mais viáveis, que podem garantir melhorias à coleta, interpretação e compartilhamento de dados climáticos.

4 REVISÃO TEÓRICA

A partir das obras norteadoras “Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres” de John R. Jensen, “Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto” de Paulo Roberto Menezes e Tati Almeida (Org.) e “Sensoriamento remoto: princípios e aplicações” de Evelyn M. L. de M. Novo, o sensoriamento remoto pode ser compreendido como:

“[...] o registro da informação das regiões ultravioleta, visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares e/ou matriciais localizados em plataformas tais como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens.” (JENSEN, 2009);

“[...] uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.” (MENESES; ALMEIDA, 2012)

Ou ainda,

“[...] a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra e as suas mais diversas manifestações”. (NOVO, 1995)

O estudo do clima urbano, isto é, um sistema que, de acordo com Lombardo (1985) e Dias (2014), abrange a conexão entre clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização em que alterações são decorrentes em termos de espaço construído, características geomorfológicas e geoecológicas, intensidade do uso do solo e processo de crescimento urbano, podendo comprometer a qualidade de vida dos habitantes de uma cidade ao afetar negativamente o conforto térmico (MONTEIRO, 1976) ao gerar ilhas de calor² ou positivamente ao gerar ilhas de frescor³, favorece-se pela alta disponibilidade de dados de sensores termais e técnicas de sensoriamento. A temperatura de superfície terrestre é a principal variável utilizada nestes estudos, contudo, sua correta interpretação – relação entre dados obtidos por sensoriamento e propriedades reais da superfície – requer definições e aplicações adequadas das variáveis envolvidas nos processos de geração de ortofotos.

Os dispositivos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) do satélite Landsat-8 captam somente representações digitais dos valores de radiância ou emitância, expressos em números digitais (ND)⁴, que são convertidos em parâmetros físicos, caracterizando espectralmente o alvo e permitindo a comparação entre bandas. É necessário, após a conversão do ND para valor de radiância, a conversão do valor de radiância para a refletância, de forma a obter os valores da quantidade de energia de cada um dos comprimentos de onda que incidiu na superfície e, a partir disso, extrair as propriedades específicas dos objetos em superfície no instante que a cena foi tomada, ou seja, a reflectância de superfície (RS). Além disso, também, a conversão da temperatura de temperatura de brilho de topo de

² Ilhas de calor são áreas as quais a “temperatura da superfície é mais elevada que as áreas circunvizinhas o que proporciona o surgimento de circulação local [...] ocorre devido à redução da evaporação, ao aumento da rugosidade e às propriedades térmicas dos edifícios e dos materiais pavimentados [...] a poluição pode influir na absorção e reemissão da radiação na área ocupada pela cidade” (LOMBARDO, 1985 p. 24).

³ Ilhas de frescor são o posto das ilhas de calor, onde “a paisagem se torna menos artificial e mais arborizada, o emprego de materiais de construção que retenham menos energias, jardins coletivos, telhados verticais, paredes residenciais” (AZEVEDO, et. al., 2017 p. 2015) entre outras alternativas conscientes.

⁴ A partir de Soares et. al. (2015) e Meneses e Almeida (2012), número digital é a quantização da resolução radiométrica, que é a intensidade, ou as diferenças de intensidade, de radiância detectada em cada pixel da ortofoto, expresso em *bits* e disponíveis em escala de cinzas na ortofoto.

atmosfera⁵ para temperatura de superfície terrestre foi necessária ao sensor TIRS. Os valores e parâmetros utilizados para as conversões foram compreendidos e obtidos a partir do manual “*Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*” do *Department of the Interior U.S. Geological Survey*, além de matérias e artigos presentes nos sites da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e do próprio *U.S. Geological Survey*.

Nas cenas termais é necessário, ainda, determinar a relação entre temperatura cinética⁶ e a temperatura radiométrica utilizando a lei de Stephan-Boltzmann, que demonstra a relação existente entre a quantidade de energia que um corpo emite (emitância radiante) e a temperatura do corpo e, além disso, compensa as diferenças do modelo conceitual do corpo negro com objetos reais ao acrescentar o valor de emissividade de cada material a equação.

É importante definirmos, aqui, conceitualmente a radiância, a irradiância e a reflectância em relação a radiação óptica de luz solar e a emitância em relação a radiação termal. De acordo com Meneses e Almeida (2012) a irradiância é o fluxo radiante⁷ solar incidente na superfície do terreno por área de superfície que varia no tempo de acordo com a posição e distância entre o a fonte de energia e a Terra, que pode ser efetivamente medido ao integrar as variáveis atmosféricas pela função integral:

$$E_{g\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (E_{o\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \quad (1)$$

Onde $E_{o\lambda}$ é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera, multiplicada pela transmitância atmosférica num certo ângulo zenital solar ($T_{\theta_0} \cos \theta_0$), mais a contribuição solar difusa ($E_{d\lambda}$). Desta forma a irradiância tem unidade de medida expressa em $W/m^2\mu m$. A radiância é a “medida feita pelo sensor da densidade do fluxo radiantes que deixa um elemento de área de superfície do

⁵ A temperatura de brilho é a radiância registrada pelo sensor em determinado comprimento de onda termal sem qualquer correção de influências sobre a radiação desde sua emissão pela superfície até atingir o sistema sensor (OLIVEIRA, T.L de; TEIXEIRA JR, J.F, 2017 apud. VOOGT, J.A., OKE, T.R., 2003)

⁶ É o grau de agitação ou movimento dos átomos e das moléculas de um corpo, Meneses e Almeida (2012).

⁷ O fluxo radiante, segundo Meneses e Almeida (2012), é a taxa na qual a energia radiante – que por sua vez é a energia que se propaga de uma fonte, no caso dos sensores imageadores OLI e TIRS é o Sol, na forma de ondas eletromagnéticas – é transferida de um ponto ou superfície para outra superfície e medido por uma quantidade de tempo.

terreno, e que se propaga em uma direção definida por um cone elementar de um ângulo sólido⁸ contendo aquela direção” (MENESES; ALMEIDA, 2012 p. 22), que é medida pela função integral:

$$L_T = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho \lambda T_{\theta v} (E_{o\lambda} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \quad (2)$$

Assumindo que a superfície da Terra seja um refletor difuso perfeito, onde ρ é a reflectância média da superfície do alvo e π é o espaço hemisférico. A quantidade total de radiância que deixa a superfície de um alvo em direção ao sensor é medida por $W/m^2str\mu m$. Já a reflectância é a “razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (radiância) pela quantidade de energia incidente naquelas áreas (irradiância), medida no mesmo instante de tempo.” (MENESES; ALMEIDA, 2012 p. 23) que é medida em porcentagem.

A emitância é um conceito próximo e, por muitas vezes, tido como sinônimo de radiância, uma vez que “os mecanismos de imageamento no termal são iguais ao do imageamento feito com os sensores ópticos e os mesmos conceitos sobre resoluções espacial, espectral e radiométrica também se aplicam aos sensores termais” (MENESES; ALMEIDA, 2012 p. 55), porém se refere a concentração da quantidade de fluxo radiante que sai do objeto⁹ e expressa em temperatura radiométrica¹⁰. É expressa em emissividade (ϵ), que varia em cada objeto de acordo com sua composição química e física, “representada pela relação entre a radiância real emitida pelo corpo do mundo real e pelo corpo negro¹¹ à mesma temperatura” (MENESES; ALMEIDA, 2012 p. 52).

⁸ O ângulo sólido é “a convergência ou divergência angular, em três dimensões, do fluxo de ou para uma superfície [...] definido como a razão da superfície de área da esfera pelo quadrado do raio da esfera.” (MENESES; ALMEIDA, 2012 p. 22), tendo como unidade de medida *str* (esterradiano).

⁹ A área de superfície a qual se incide o fluxo radiante solar interage absorvendo partículas denominadas fótons, aumentando o estado energético do material, contudo, eventualmente o material retorna a seu nível energético regular, liberando os fótons absorvidos na banda do infravermelho termal, segundo Meneses e Almeida (2012).

¹⁰ Registro da intensidade da radiação equivalente a temperatura radiante aparente no terreno, devido a propriedade de emissividade dos corpos naturais, como visto em Meneses e Almeida (2012).

¹¹ Conceito desenvolvido por Kirchoff e Planck que designa o corpo que transforma em calor toda a radiação que sobre ele incide, ou seja, um modelo teórico de um corpo 100% absorvedor, Meneses e Almeida (2012).

A correção atmosférica foi conceitualmente estabelecida como degradações ou distorções radiométricas que alteram a ortofoto por completo com intensidade dependente do comprimento de onda, da data do imageamento e da trajetória da radiação, atuando como um refletor ao adicionar radiância extra ao sinal enviado pelo sensor e como um absorvedor ao atenuar a intensidade de energia que ilumina o alvo na superfície, segundo Meneses e Almeida (2012). A interferência causada irá alterar os valores de brilho e contraste da cena e, conseqüentemente, os valores de radiância expressos nos números digitais (ND). Elimina-se, então, os efeitos atmosféricos através da aplicação dos modelos de correção radiométrica e de valores de transmissividade atmosférica, radiância emitida e recebida pela superfície. O modelo escolhido foi apresentado por Barsi (2003), o qual, de acordo com Oliveira e Teixeira (2017), converte os dados de radiância no topo da atmosfera para radiância de um corpo negro de temperatura cinética, em que a atmosfera é corrigida e a emissividade dos alvos é inserida no cálculo. Este é o modelo mais indicado para correção atmosférica de radiância termal, uma vez que inclui a correção pela emissividade dos materiais da superfície analisada.

A temperatura de superfície terrestre obtida necessita ser espacializada com o auxílio métodos de interpolação de dados espaciais, uma vez que permitem a visualização de tendências de distribuição espacial das variáveis climatológicas em áreas sem estações de monitoramento (MARTINS, A.P.; ALVES, W.S.; DAMASCENO, C.E., 2019), de forma a simular processos e prever efeitos (CHRISTOFOLETTI, 2000). O método geoestatístico da CoKrigagem¹² é que melhor enquadra em nosso estudo, pois, seguindo o raciocínio de Yamamoto e Landim (2003) e explicado por Martins (2019), a cidade de São Paulo possui uma grande cobertura de pontos de monitoramento e as temperaturas instantâneas apresentam “grande interdependência com fatores ambientais como intensidade da radiação, direção da vertente onde a estação se localiza, altitude e microclima do entorno (localização da estação em áreas urbanas, rurais, com vegetação conversava, etc).” (MARTINS, A.P.;

¹² Extensão multivariada da krigagem, que baseia-se na ideia de que quanto maior a covariância entre uma amostra e o local que está sendo estimado mais essa amostra deve contribuir com a estimativa, utilizada quando a variável de interesse pode ser subestimada ou superestimada em relação a outras covariáveis, admitindo a inserção de até três variáveis secundárias (MARTINS, A.P.; ALVES, W.S.; DAMASCENO, C.E., 2019).

ALVES, W.S.; DAMASCENO, C.E 2019 p. 462). Essa fase é essencial para validar e estabelecer os resultados da pesquisa, isto é, a comparação entre os valores estimados por sensoriamento remoto e os valores medidos pelas estações meteorológicas, classificando seu desempenho e medindo o erro presente entre os valores. Por fim, a correlação dos dados estimados pelo sensoriamento remoto e medidas pelas estações meteorológicas passam por tratamento estatísticos¹³ e os resultados quantitativos são separados em classes qualitativas de desempenho.

5 ÁREA DE ESTUDO

5.1 LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO METROPOLITANO

Situada no sudeste do Brasil, a cidade compõe a capital administrativa do Estado de São Paulo e atua como núcleo central da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), criada em 1973, a qual conta com 39 municípios, reorganizados em 2011 pela LC 1.139 que instituiu o Conselho de Desenvolvimento e agrupou seus municípios em sub-regiões: Norte, Leste, Sudeste, Sudoeste e Oeste; sendo que o Município de São Paulo integra todas as sub-regiões mencionadas. De acordo com a Emplasa:

“Em 2016, seu Produto Interno Bruto (PIB) correspondia a aproximadamente 17,7% do total brasileiro e a quase metade do PIB paulista (54,35%). Vivem nesse território quase 50% da população estadual, aproximadamente 21,6 milhões de habitantes, segundo estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para 2018. A metrópole centraliza importantes complexos industriais (São Paulo, ABC, Guarulhos e Osasco), comerciais e, principalmente, financeiros (Bolsa de Valores), que dinamizam as atividades econômicas no país.” (Emplasa, GIP/CDI, 2019)

¹³ Cálculos de desvio padrão, variação, regressão e correlação.

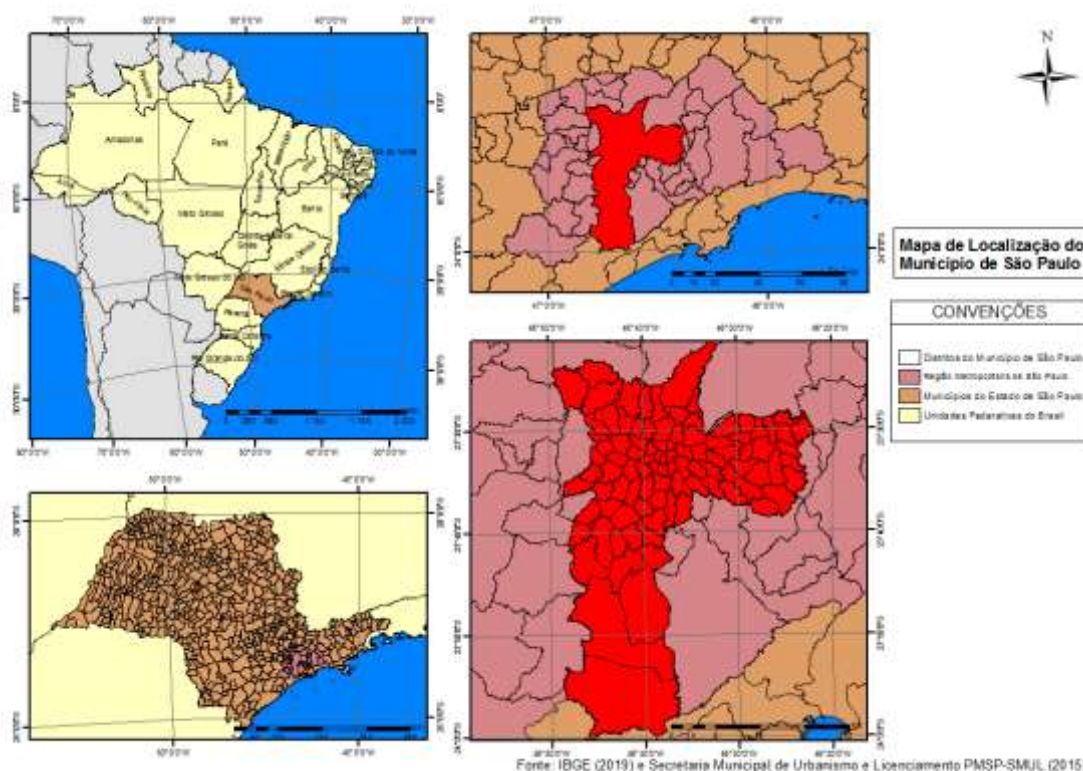


Figura 1 - Mapa de localização do município de São Paulo. Fonte: IBGE, 2019 e Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento da Prefeitura Municipal de São Paulo, 2015. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

A cidade de São Paulo, com mais de 12 milhões de habitantes e com 1521 km² (IBGE, 2016), é subdividida em 96 distritos, os quais administrativamente são agrupados em 32 subprefeituras¹⁴. Por sua vez, tais áreas administrativas e distritos, são categorizados em dez zonas geográficas: Noroeste, Nordeste, Oeste, Centro-Sul, Centro, Sudeste, Sul, Leste 1 e Leste 2. A partir do mapa de Regiões, Subprefeituras e Distritos do Município de São Paulo, disponibilizado pela Secretaria Municipal do Planejamento Urbano (SEMPULA) da Prefeitura de São Paulo, pode-se visualizar melhor a posição de cada um dos 96 distritos e 32 subprefeituras.

¹⁴ A lista de subprefeituras e distritos, assim como dados de área, população e densidade demográfica, pode ser consultada junto a página da Secretaria Municipal de Subprefeituras da cidade de São Paulo.

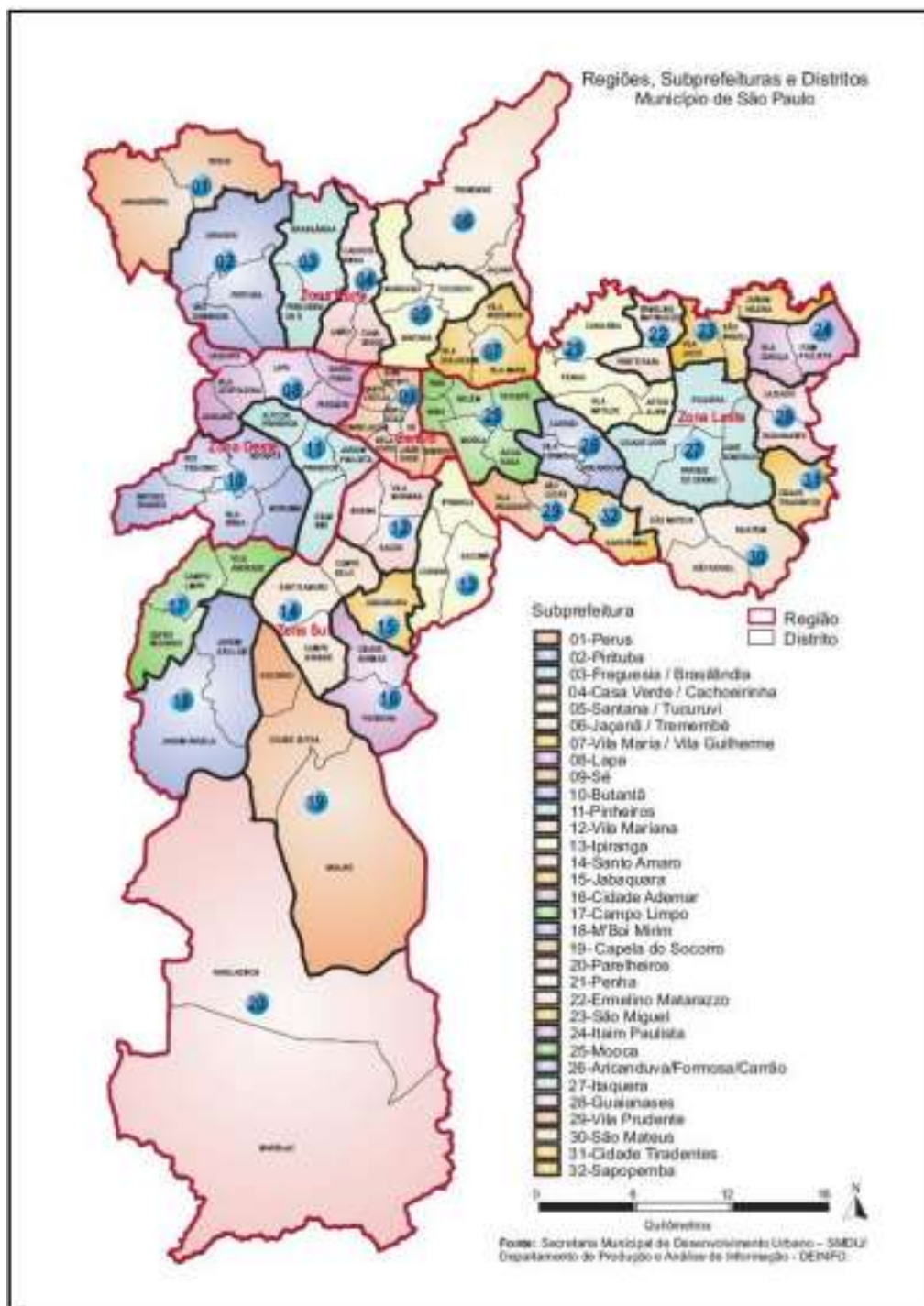


Figura 2 - Subprefeituras e distritos do Município de São Paulo. Fonte: PMSP - SMDU, Departamento de Produção e Análise de Informação, 2013.

5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS

O Município de São Paulo ocupa terrenos cujo substrato é composto por rochas cristalinas de idade pré-cambriana e situados em morros, morrotes e serras, representadas por granitos, granodioritos, monzogranitos e granitóides

indiferenciados, que ocorrem predominantemente na região norte, sustentando a Serra da Cantareira e, ao sul, em corpos isolados; por metassedimentos de natureza diversificada e metavulcânicas básicas dos grupos São Roque e Serra do Itaberaba; e por rochas do Complexo Embu, constituído por migmatitos, gnaisses, xistos e quartzitos. É composto também por camadas de sedimentos terciários situados na Bacia Sedimentar de São Paulo e ocorrem em toda a área central do Município, bem como ao longo da margem esquerda do rio Tietê e em manchas isoladas ao sul, ao norte (região de Santana) e no sudoeste, e por sedimentos relativamente mais recentes, correspondentes ao período quaternário, compostos por depósitos aluviais, que ocorrem ao longo das várzeas dos rios e córregos atuais, destacando-se as planícies dos rios Tietê (que na região do Pari e Vila Maria chega a 14 km de largura), Pinheiros e Tamanduateí, intensamente remodeladas pela ação humana, por meio de retificações dos canais e aterramento das várzeas. (PMSP, 2004)

De acordo com Aziz Ab'Saber:

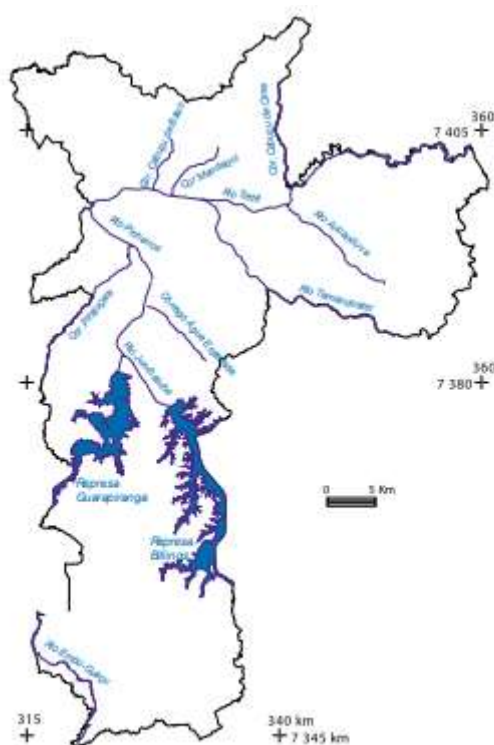
“A originalidade geográfica principal do sítio urbano de São Paulo reside na existência de um pequeno mosaico de colinas, terraços fluviais e planícies de inundação, pertencentes a um compartimento restrito e muito bem individualizado do relevo da porção sudeste do Planalto Brasileiro” (Ab'Saber, 1957)

A Região Metropolitana de São Paulo, salvo alguns municípios periféricos onde predominam as áreas cristalinas, enquadra-se na faixa altimétrica de 740-800 m, correspondendo à Bacia Sedimentar Terciárias de São Paulo e as bacias sedimentares do período quaternário ao longo dos rios, com destaque as bacias dos rios Tietê e Pinheiros. Há áreas, contudo, que chegam a ultrapassar os 1000 metros sobre o nível do mar, representadas pela Serra da Cantareira (norte), Itapevi (leste), serra do Mar (sul) e os maciços elevados de Itapeckerica-São Roque (oeste-sudoeste). (LOMBARDO, 1985)

5.3 CONTEXTO HIDROGRÁFICO

A maior parte dos terrenos do Município se situa na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI do Alto Tietê), subdivididas em bacias: Cotia-Guarapiranga, Pinheiros-Pirapora e

Billings-Tamanduateí. Porção menor está inserida no contexto de cursos d'água que drenam para o litoral, situada na UGRHI da Baixada Santista. Os principais cursos d'água que percorrem o Município são os rios Tietê, Pinheiros, Tamanduateí, Aricanduva e Embu-Guaçu, além dos córregos Pirajuçara, Ipiranga, Cabuçu de Cima, Cabuçu de Baixo e Mandaqui, entre outros. (PMSP, 2004)



Fonte: PMSP (2002).

Figura 3 - Principais cursos d'água e represas do município. Fonte: Prefeitura Municipal de São Paulo, 2004. Elaborado por: Prefeitura Municipal de São Paulo, 2002

5.4 ECOSSISTEMA E COBERTURA VEGETAL

O Município se situa nos domínios do bioma ou ecossistema regional denominado Mata Atlântica. Em contraste com sua densa mancha urbana, possui ainda importantes áreas verdes, localizadas de forma concentrada (75%) principalmente no extremo sul, na Área de Proteção Ambiental Capivari-Monos, e na região norte da cidade, em área do parque Estadual da Serra da Cantareira (SVMA/Sempla, 2002).

A cobertura vegetal existente no Município é composta por fragmentos de vegetação nativa secundária (floresta ombrófila densa, floresta ombrófila densa alto montana, floresta ombrófila densa sobre turfeira, formações de várzea e campos naturais). A distribuição da arborização urbana, tanto com espécies nativas quanto com exóticas, mostra-se, também, desigual no Município. Há ruas bem arborizadas e ruas onde a vegetação é ausente. (PMSP, 2004)



Fonte: IPT (a partir de imagem de satélite obtida pelo sensor ETM - *Enhanced Thematic Mapper* do satélite Landsat-7, em 03.05.2001).

Figura 4 - Distribuição espacial dos principais fragmentos de vegetação nativa do município de São Paulo. Fonte: Prefeitura Municipal de São Paulo, 2004. Elaborado por: IPT, 2001¹⁵.

5.5 ASPECTOS CLIMÁTICOS

Numa descrição genérica, pode-se dizer que “as condições locais da bacia de São Paulo criaram, nesta cidade do trópico de Capricórnio um clima temperado, cuja designação melhor seria: tropical temperado pela altitude, em contraste com o hinterland quente e com o litoral tropical do Estado” (FRANÇA,

¹⁵ No tópico 7.1 Uso e ocupação do solo e temperatura da superfície terrestre, é possível visualizar a distribuição espacial da vegetação no município de São Paulo, com dados referentes a 2020, contudo, não é um mapeamento oficial.

1946). Contudo, a disposição do relevo do município de São Paulo “contribui para aumentar a intensidade da ilha de calor, assim como favorece a concentração de poluentes” (LOMBARDO, 1985).

Dito isto, e considerando que a cidade de São Paulo é uma megacidade¹⁶, o processo de urbanização e de distribuição caótica da concentração demográfica geram alterações climáticas e impactos que podem ser separados em, segundo Schneider (2006), “impactos que se originam nas áreas urbanas e que têm efeitos negativos sobre as mudanças climáticas e mudanças climáticas que têm efeitos negativos sobre as áreas urbanas”.

O clima local da cidade, assim, apresenta significativas transformações que são originadas pelo modo como a urbanização dá-se: intensa verticalização, compactação e impermeabilização do solo, supressão da vegetação e cursos d’água, autoconstrução com materiais impróprios. Contudo, há de considerarmos, também, questões naturais, segundo Lombardo (1985):

“Na análise do clima local, deve-se ressaltar a posição geográfica da Bacia Sedimentar de São Paulo, deprimida topograficamente em relação ao entorno, o que contribui para a formação de ventos locais, catabáticos, com movimentos convergentes, possibilitando um aumento de temperatura. Associando-se ao fato de São Paulo ser rodeada de anfiteatro montanhoso, a rugosidade urbana tende a modificar o fluxo de vento nos baixos níveis” (LOMBARDO, 1985).

e

“A brisa marítima, com ventos úmidos, ocorre frequentemente sobre São Paulo. Os ventos conduzidos pelo vale do Tamanduateí e Pinheiros, principalmente durante o final da tarde e à noite, contribuindo para o aumento do teor de umidade no ar na parte meridional da mancha urbana. A brisa marítima parece contribuir, desse modo, para amenizar o efeito da ilha de calor na parte sul e sudeste da área urbana” (LOMBARDO, 1985)

O crescimento da área construída e da população não vieram sozinho, este processo ocorre concomitante a produção industrial e automobilística, que liberam à atmosfera gases do efeito estufa (GEE) e resíduos sólidos. De acordo com o Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa de 2010 a 2017 do Município de São Paulo do Comitê do Clima da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente da Prefeitura de São Paulo (2019) constata que

¹⁶ Megacidade é um conceito estabelecido pela ONU para categorizar centros urbanos com população acima de 10 milhões de habitantes.

“a maior parte das emissões de gases de efeito estufa no município são provenientes do setor de transporte, principalmente devido ao uso de combustíveis fósseis (gasolina e diesel); em segundo lugar está o setor de Energia Estacionária e, em terceiro, o de Resíduos.”

Assim, pode-se dividir o clima da cidade de São Paulo em duas categorias, como realizada pelo Atlas Ambiental do Município de São Paulo (2002): unidades climáticas naturais e unidades climáticas urbanas.

As unidades climáticas naturais foram divididas em: Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico, ocupando a área da Bacia Sedimentar de São Paulo, onde a urbanização primeiramente instalou-se, que por sua vez foi dividido em três mesoclimas: a) os topos mais elevados dos maciços, serras e altas colinas, b) as colinas intermediárias, morros baixos, terraços e patamares; e c) as várzeas e baixos terraços; Clima Tropical Úmido Serrano da Cantareira – Jaraguá, dividido em dois mesoclimas: a) os maciços e serras da face meridional da Cantareira e Jaraguá, onde está inserido o Parque da Cantareira, e b) os maciços e serras da face setentrional da Cantareira e Jaraguá, ocupando os topos voltados para a Bacia do Juquerí; Clima Tropical Úmido de Altitude do Alto Juquerí, face Norte (setentrional) da Serra da Cantareira e do Pico do Jaraguá, subdividido em dois mesoclimas: a) referente aos morros e espigões do Alto Juquerí – Tietê, e b) aos terraços e as várzeas do Vale do Juquerí; Clima Tropical Sub-oceânico Superúmido do Reverso do Planalto Atlântico, ao Sul da represa de Guarapiranga com maior proximidade ao oceano, dividido em: a) os morros e espigões elevados do Alto Pinheiros e Embú-Guaçu, e b) morros e nascentes do Alto Pinheiros e Embú-Guaçu, que foi subdividido em dois topoclimas, b1) referente aos próprios morros e nascentes e b2) referente ao espelho d’água da represa Billings; por fim, o Clima Tropical Oceânico Superúmido da fachada Oriental do Planalto Atlântico, dividido em três mesoclimas: a) serras e altos espigões da Fachada Oriental do Planalto Atlântico, b) morros, serras e escarpas do Alto Capivari-Monos, e c) escarpa oriental do Planalto Atlântico (Serra do Mar).

As unidades climáticas urbanas são divididas em duas macros unidades climáticas: Unidade Climática Urbana Central e Unidade Climática Periférica. A Unidade Climática Urbana Central é subdividida em sete mesoclimas urbano: a) o centro histórico, a verticalização densa e contínua que se estende para a Zona

Sul, passando pela Liberdade, Vila Mariana, até as proximidades com o Parque do Estado, que se expressa pela alta densidade de edificações, pessoas, veículos e atividades; b) a urbanização dos vales do Tietê, Tamanduateí e Pinheiros, caracterizadas como grandes bacias produtoras de toneladas de poluentes; c) a ligação da Vergueiro com a Anchieta (antigo Caminho do Mar) passando por parte do Jabaquara, Saúde, Ipiranga até os limites com o Parque do Estado e São Caetano do Sul, com principal característica o predomínio do residencial baixo¹⁷; d) a travessia do Rio Pinheiros a caminho da Zona Oeste (Raposo Tavares e Br116) entre altitudes que vão de 720m (Raia Olímpica da USP) à aproximadamente 800 metros, uma unidade climática privilegiada pelo verde e pela expansão de bairros nobres; e) a verticalização atual da Av. Luís Carlos Berrini até o contato (transição) para a zona industrial, caracterizada por um núcleo bem definido, comercial - residencial baixo ao lado do industrial ou via de circulação (Marginal) e protegido pelo verde da Chácara Santo Antônio; f) a expansão urbana para o além Tamanduateí produziu bairros (Mooca, Tatuapé, Água Rasa, Carrão, Vila Formosa, Penha, Vila Matilde) com altíssima densidade de pessoas e porcentagem muito pequena de áreas verdes, na qual a forma urbana mostra uma homogeneidade considerável, tanto no forte aquecimento, na ausência do verde e na poluição atmosférica elevada, caracterizando um espaço urbano muito homogêneo nas transformações climáticas pelas práticas espaciais e sócio-econômicas; e g) a Zona Norte ou Além Tietê, constituindo-se em uma extensa faixa urbana com orientação Leste-Oeste. Alinhada estruturalmente pelo vale do Tietê, recebe permanentemente influências dos maciços serranos da Cantareira e do Jaraguá. Este extenso divisor de águas das bacias do Tietê – Juquerí (900 a 1.000 metros), e seu bloco de terras elevadas melhora a dispersão dos poluentes e altera os fluxos atmosféricos nos transportes verticais e horizontais na proximidade do solo.

Já a macro unidade climática periférica é definida pelo “processo de favelização, com amontoamento de casebres e seres humanos, quase sem as mínimas condições ambientais para a reprodução da vida foi o principal”

¹⁷ Casas ou edificações de 1 a 2 andares de classe média ou média baixa geralmente com cobertura de telhas de cerâmica de cor avermelhada.

(SMVA/PMSP, 2002). Os microclimas dos “casebres” da periferia urbana da metrópole é, segundo Tarifa e Armani (SMVA/PMSP, 2002):

“[...] unidades climáticas extremas, ora rios de lama, sujeira e inundações, ora calor insuportável, ora frio demais, poluição, asma, bronquite, pneumonia de milhões de seres humanos, trabalhadores, operários deste país. São estes os “climas urbanos”, ou seja, o calor extremo, evidente nas imagens de satélite, ou substituídos por áreas termicamente mais “amenas” dos altos declives dos morros, ou pelo sombreamento dos fundos de vale. Mudam-se os lugares, mas os “riscos” climáticos contra a vida são os mesmos nos morros mais elevados. As temperaturas e o 113 aquecimento e as amplitudes térmicas são menores, mas os impactos pluviais são mais elevados e mais intensos, aliados às altas declividades, bem como à fragilidade da estrutura superficial (solo-rocha-relevo e tipo de ocupação) da paisagem, os riscos se tornam permanentes de perdas de vida. As favelas e cortiços das várzeas e fundos de vale vão receber sazonal e rotineiramente, como se fizesse parte do cotidiano determinado pelo econômico, a inundação das casas e a proliferação de doenças daí advindas.” (SMVA/PMSP, 2002)

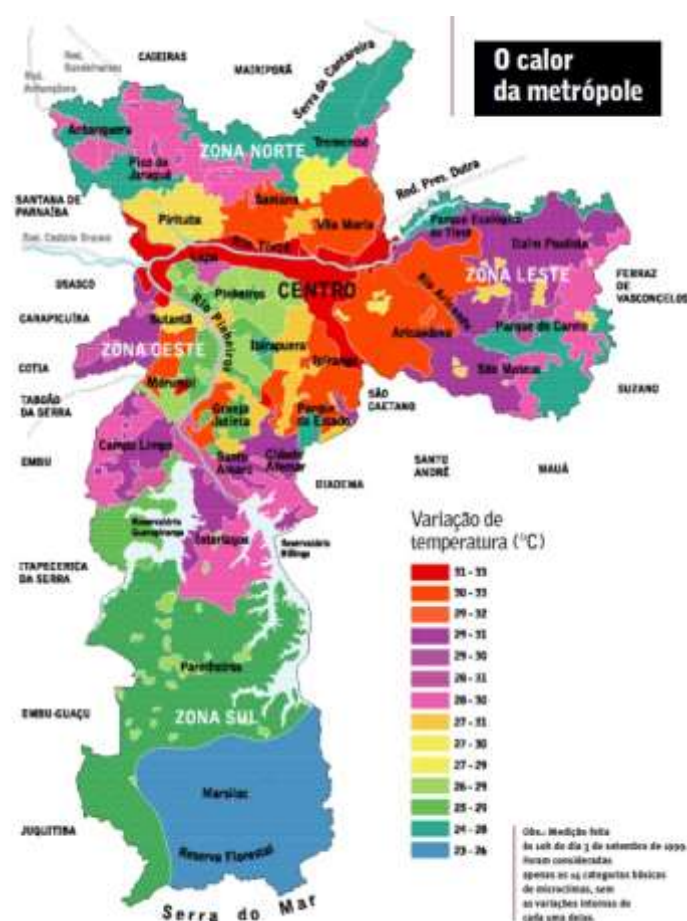


Figura 5 - O calor da metrópole: São Paulo e seus 77 climas. Fonte: As unidades climáticas urbanas da cidade de São Paulo: os climas e a (re)produção do espaço nas metrópoles. Elaborado por: Tarifa e Armani, 2000.

6 PROCEDIMENTOS METOLÓGICOS E TÉCNICOS

6.1 AQUISIÇÃO DE CENAS

As cenas Landsat-8 registradas e ortorretificadas foram adquiridas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e podem ser acessadas através da plataforma *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). As cenas selecionadas são respectivas aos imageadores *Operational Terra Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) com um critério de qualidade de processamento da ortofoto C1 (Level-1), ou seja, os parâmetros de correção radiométrica e atmosférica ainda não foram realizados. As quatro cenas selecionadas apresentam cobertura de nuvens inferior a 5% e se inserem sobre a cidade de São Paulo, tendo suas propriedades apresentadas nas tabelas 1 e 2 e podem ser conferidas no Anexo A.

Tabela 1 – Posição latitudinal e longitudinal das cenas selecionadas. Fonte: Cenas LC82190762019021LGN00, LC82190772019021LGN00, LC82190762019229LGN00, LC82190772019229LGN00 do satélite Landsat-8 providas pelo United States Geological Survey, 2019

ID da cena	Latitude		
LC82190762019021LGN00	22°03'47.77"S	23°06'45.40"S	22°26'07.01"S
	23°47'14.32"S		24°09'51.55"S
LC82190772019021LGN00	23°52'37.70"S	24°33'11.52"S	23°30'11.92"S
	25°36'18.61"S		25°13'34.10"S
LC82190762019229LGN00	22°03'46.91"S	23°06'45.29"S	22°26'07.94"S
	23°47'13.02"S		24°09'52.09"S
LC82190772019229LGN00	23°30'10.87"S	24°33'10.98"S	23°52'38.46"S
	25°13'32.45"S		25°36'18.79"S
ID da cena	Longitude		
LC82190762019021LGN00	47°10'55.42"W	46°28'45.37"W	45°21'51.12"W
	47°36'22.90"W		45°45'53.78"W
LC82190772019021LGN00	45°41'52.30"W	46°49'34.50"W	47°32'08.81"W
	46°06'14.83"W		47°58'03.00"W
LC82190762019229LGN00	47°12'01.98"W	46°29'52.87"W	45°22'57.58"W
	47°37'31.37"W		45°47'02.11"W
LC82190772019229LGN00	47°33'16.96"W	46°50'43.58"W	45°43'00.30"W
	47°59'13.02"W		46°07'24.67"W

Um par de cenas foi selecionado para cada período analisado, uma vez que o município de São Paulo não se enquadra em uma única ortofoto. Desta forma, um mosaico de cada par de cenas, a partir da ferramenta “*Mosaic*” do software *ArcMap 10.3.1*, foi composto.

Tabela 2 – Principais dados das cenas selecionadas. Fonte: Cenas LC82190762019021LGN00, LC82190772019021LGN00, LC82190762019229LGN00, LC82190772019229LGN00 do satélite Landsat-8 providas pelo United States Geological Survey, 2019, com projeção cartográfica WGS84 na zona UTM 23S.

Unidade	Data da cena (aaaammdd)	Horário da cena	ID da cena	Tamanho do pixel	Variação dos valores
Reflectância de superfície	20190121	13:04:10	LC82190762019021LGN00	30 metros	-0.09998 a 1.2107
	20190121	13:04:34	LC82190772019021LGN00	30 metros	-0.09998 a 1.2107
	20190817	13:04:30	LC82190762019229LGN00	30 metros	-0.09998 a 1.2107
	20190817	13:04:54	LC82190772019229LGN00	30 metros	-0.09998 a 1.2107
Radiância de superfície	20190121	13:04:10	LC82190762019021LGN00	100 metros	-66.3763 a 803.77863
	20190121	13:04:34	LC82190772019021LGN00	100 metros	-66.3763 a 803.77863
	20190817	13:04:30	LC82190762019229LGN00	100 metros	-62.69944 a 759.25391
	20190817	13:04:54	LC82190772019229LGN00	100 metros	-62.69944 a 759.25403
Número digital (Count)	20190121	13:04:10	LC82190762019021LGN00	-	1 a 65535
	20190121	13:04:34	LC82190772019021LGN00	-	1 a 65535
	20190817	13:04:30	LC82190762019229LGN00	-	1 a 65535
	20190817	13:04:54	LC82190772019229LGN00	-	1 a 65535

As datas das foram definidas de acordo com a terceira normal climatológica estabelecida através das medições da Estação Meteorológica do Mirante de Santana entre o período de 1961 a 1990, na qual identificou-se a existência de dois períodos ou estações bem definidas: um quente e chuvoso de outubro a março (primavera-verão) e outro frio e relativamente mais seco, de abril a setembro (outono-inverno); tais períodos também apresentam valores de incidência solar distintos. A utilização da normal climatológica deve-se pela distribuição dos dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação dentro de uma faixa de incidência habitual – afetando também outras variáveis, como cobertura vegetal.

O horário das cenas adquiridas é intrínseco a resolução temporal do Landsat-8; embora não seja o horário ideal aos mapeamentos termais devido à alta incidência solar na superfície, a combinação da resolução espacial, espectral e radiométrica do Landsat-8 ainda o coloca como uma excelente ferramenta *opensource* para medições térmicas. Assim, foi-se escolhido ortofotos entre as 13:04 e 13:05 do dia 21/02/2019 e do dia 17/08/2019.

6.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A classificação não supervisionada das cenas deu-se a partir da técnica de pico de histograma, proposta em *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (RICHARDS, J., 1986), com uma análise *cluster*, na qual cada ortofoto (Banda) é elevada a um determinado número de níveis de cinza antes do cálculo de seus histogramas. No caso, a presente análise *cluster* utilizou 8 níveis de cinza, além de 1% de saturação, utilizando da Banda 2 a Banda 5 do satélite *Landsat-8/TM* do instrumento imageador *Operational Terra Image (OLI)*, a partir da ferramenta “*Iso Cluster Unsupervised Classification*” do *ArcMap 10.3.1*.

Tabela 3 - Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIRS.
 Fonte: United States Geological Survey (USGS). *Landsat Missions: What are the band designations for the Landsat satellites?*, abr. 2020.

Bandas Landsat-8	Comprimento de ondas (Micrometros)	Resolução (Metros)
Banda 1 – Ultra-azul	0,43 – 0,45	30
Banda 2 – Azul, classificação uso e ocupação do solo	0,45 – 0,51	30
Banda 3 – Verde, classificação uso e ocupação do solo	0,53 – 0,59	30
Banda 4 – Vermelho, classificação uso e ocupação do solo	0,64 – 0,67	30
Banda 5 – Infravermelho Próximo (NIR), classificação uso e ocupação do solo	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – Infravermelho Médio 1 (SWIR 1), classificação uso e ocupação do solo	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – Infravermelho Médio 2 (SWIR 2), classificação uso e ocupação do solo	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Pancromática	0,50 – 0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Infravermelho Termal 1 (TIRS 1), geração da temperatura de brilho e sup	10,60 – 11,19	100
Banda 11 – Infravermelho Termal 2 (TIRS 2)	11,50 – 12,51	100

A classificação não-supervisionada detém um baixo nível de generalização, desta forma, foi aplicada uma sequência de técnicas e ferramentas de análise espacial e generalização para que se produza uma ortofoto mais adequada a um mapa de uso e cobertura do solo. Resumidamente,

os pixels erroneamente classificados foram removidos com uma dupla aplicação da ferramenta “*Majority Filter*”; os limites entre classes foram suavizados com uma dupla aplicação do “*Boundary Clean*”, a primeira permitindo que zonas menores expandam e invadam o limite de zonas maiores e a segunda executando o processo inverso; os pixels foram divididos e agrupados em regiões a partir da ferramenta “*Region Group*”; por último, foi criada uma máscara na qual pixels com valores de *Count* inferior a 500 foram codificados como *NULL*, para assim regiões menores pudessem ser excluídas através da ferramenta “*Nibble*”.

Ao fim dos processos de generalização, a raster contendo 8 classes foi reclassificada para uma raster de 6 classes de maior interesse do presente trabalho, sendo:

Tabela 4 – Tabela de classificação do uso e cobertura do solo.

1	Solo Exposto e Areia
2	Superfícies Líquidas
3	Vegetação – Média e Alta Densidade
4	Vegetação – Baixa Densidade e Pastagens
5	Área Urbana – Média e Alta Densidade
6	Área Urbana – Baixa Densidade

6.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO SOLO

A partir da classificação de uso e cobertura do solo geradas na etapa anterior em vegetação, área urbana, solo exposto e superfície aquática, tornou-se possível a realização de uma reclassificação a partir das emissividades dos alvos, isto é, a capacidade de emissão de energia por radiação da sua superfície, que compõem cada classe anteriormente estabelecida, utilizando a Tabela de Emissividade disponibilizada pela Contemp Indústria, Comércio e Serviços Ltda., elaborada a partir de referências internacionais, definimos cinco principais

materiais: vegetação verde, água, concreto (pavimentação, enrijecido e seco) e solo (terra seca e areia).

Tabela 5 - Emissividade dos materiais considerados expressas pela quantidade de energia emitida pelo corpo (W') pela quantidade de energia emitida pelo corpo negro (W). Fonte: Contemp Indústria, Comércio e Serviços Ltda. Tabelas de Emissividades, 2017.

Material	Emissividade ($E = W'/W$)	Média estabelecida
Vegetação	0,96 – 0,99	0,97
Água	0,92 – 0,98	0,95
Concreto	0,92 – 0,97	0,94
Solo	0,90 – 0,94	0,92

A partir da definição das emissividades dos corpos que cobrem a superfície da cena escolhida, demos início às composições das imagens do imageador TIRS, isto é, a Banda 10 e 11 do infravermelho termal, já caracterizado na Tabela 2.

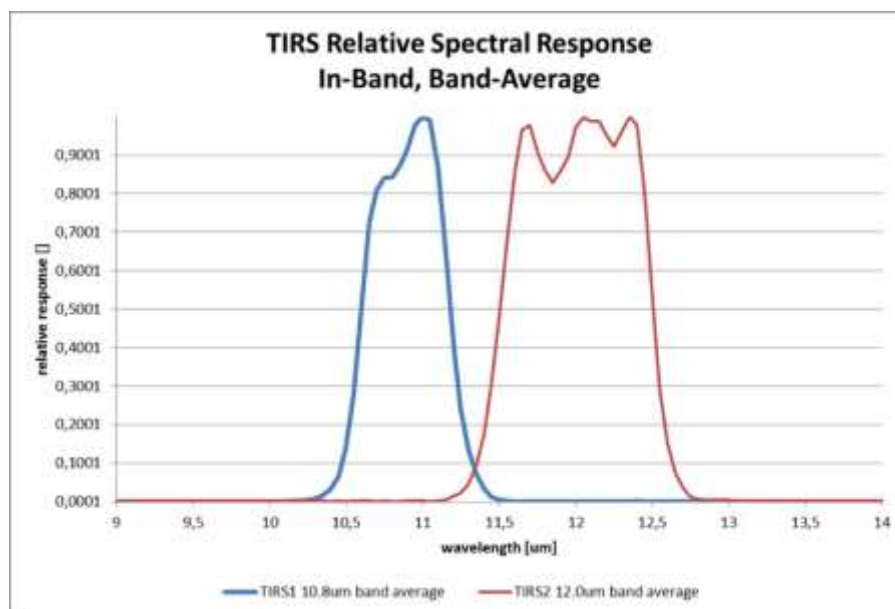


Figura 6: Curvas espectrais das bandas do instrumento imageador TIRS Fonte: United States Geological Survey (USGS). Landsat Missions: Using the USGS Spectral Viwer, abr. 2020.

O sensor TIRS registra a radiância de energia refletida do alvo, expressa pela Equação 3:

$$R_{alvo} = \left(\frac{H(\rho\tau+B)}{\pi} \right) \text{seno } \alpha \quad (3)$$

onde H é a energia solar que chega ao alvo, ρ é a refletância do alvo em porcentagem, τ é a transmitância da atmosfera, B é o efeito atmosférico de tipo aditivo e α é o ângulo de elevação solar, expressa em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$

A radiância de energia refletida é convertida para radiância de energia emitida, também tendo como unidade de medida $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$, expressa pela Equação 2, com o uso da lei de Stephen-Boltzman, expressa pela Equação 4 e 5:

$$R_{alvo} = \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \quad (4)$$

$$M_{do \text{ corpo negro}} = \sigma T^4 \text{ e } M_{do \text{ corpo real}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8}$) expressa em $Wm^{-2}K^{-4}$, ε é a emissividade do alvo, M é a emitância do corpo e T é a temperatura de brilho em Kelvin (K).

Para a realização destas equações será utilizado a ferramenta *Thermal* do software *Idrisi Selva 17.0*, o qual baseia-se na publicação de Bartoliucci e Chang (1988). A raster térmica processada será respectiva a Banda 10 do Landsat-8, uma vez que em análises quantitativas a Banda 11 possui uma maior incerteza de calibração, pois é mais contaminada pela dispersão da luz.

Os parâmetros de *gain*, *offset*, *K1* e *K2*, não estabelecidos automaticamente pelo Sistema de Informação Geográfico (SIG), necessitará ser definido para processo de mapeamento termal. Primeiramente é necessário redimensionar as imagens de *16-bits* para radiação de topo de atmosfera (TOA), utilizando coeficientes de reescalamiento radiométrico fornecidos no arquivo de metadados do produto (arquivo MTL), de acordo com a Equação 6:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \text{ ou } L_{\lambda} = gain \times DN + offset \quad (6)$$

onde L_{λ} é a radiância espectral de topo de atmosfera expressa em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$; M_L é a banda multiplicativa do fator de redimensionamento dos metadados (RADIANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda), Q_{cal} é o valor padrão de pixels do produto quantificados e calibrados e A_L é a banda

aditiva do fator de redimensionamento dos metadados (RADIANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda). Comparando, então, ambas as equações, tem-se M_L como valor de *gain*, Q_{cal} como valor do *número digital* e A_L como valor de *offset*.

A segunda etapa será converter os dados de radiância no topo da atmosfera para radiância de um corpo negro de temperatura cinética, a partir do método de correção atmosférica pela emissividade dos materiais da superfície proposto por Barsi (2003), conforme a equação 7:

$$L_T = \frac{L_{TOA} - L_u - (1 - \varepsilon)L_d}{\varepsilon\tau} \quad (7)$$

onde: L_T é a radiância de um alvo negro de temperatura termodinâmica, na qual T é expresso por $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$; L_{TOA} é a radiância espectral no topo da atmosfera em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ que equivale a L_λ ; τ é transmitância da atmosfera; ε é a emissividade da superfície; L_u é a radiância emitida pela atmosfera em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$; e L_d é a radiância incidente na superfície em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$.

Os valores de transmitância atmosférica, radiância emitida pela atmosfera e radiância incidente na superfície foram calculados através da Calculadora de Correção Atmosférica (WEBCALC) disponibilizada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) no endereço eletrônico <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. Os dados de entrada (pressão, temperatura e umidade relativa do ar) foram obtidos junto ao banco de dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A emissividade da superfície foi atribuída a partir da média ponderada da emissividade atribuída as classes de uso e ocupação do solo obtidas com a classificação não supervisionada, apresentadas na tabela dois, tendo pesos proporcionais a área ocupada por cada categoria.

A terceira etapa será converter os dados TIRS para temperatura de brilho do satélite usando as constantes termais disponíveis no arquivo de metadados, de acordo com a Equação 8:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (8)$$

onde T é a temperatura de brilho do satélite expressa em *Kelvin* (K) e K_1 e K_2 são constantes de conversão dos metadados para as imagens termais, podendo ser encontrados em (K1_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda termal) e (K2_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda termal).

Convertendo, então, as imagens térmicas em dados de temperatura do corpo negro e realizando a correção a partir das emissividades dos alvos, podemos estabelecer a temperatura real dos corpos da superfície terrestre efetuando a Equação 9:

$$S_t = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda x T_B}{\rho} \right)^x \frac{1}{n\varepsilon}} \quad (9)$$

onde T_B é a temperatura de brilho, λ é o comprimento de onda da radiação emitida em micrometros, $\rho = hx \left(\frac{c}{\sigma} \right) = 1.438 \times 10^{-2} (mK)$, σ é a constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$), h é a constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} Js$), c é a velocidade da luz ($2.998 \times 10^8 ms^{-1}$) e ε é a emissividade na área. R é a radiância do alvo, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$) e E é a emissividade do alvo.

6.4 ANÁLISE CORRELATIVA ENTRE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E DO AR

Após as imagens de temperatura da superfície terrestre com correção de emissividade dos meses de outono-inverno e primavera-verão serem compostas, os dados serão interpolados espacialmente, receberão análise estatística descritiva e será identificada a correlação existente entre os dados obtidos por sensor e por estação meteorológica, seguindo a metodologia de Martins, Alves e Damasceno (2020), utilizando o software ArcGIS 10.3.1®.

As tabelas de dados em formato .xls das estações meteorológicas serão georreferenciadas e transformadas em vetor de pontos no formato shapefile. A ferramenta Geostatistical Analyst irá gerar isotermas a partir dessas informações, que serão espacializadas utilizando o método CoKrigagem, no qual associará a variável temperatura instantânea do ar com dados de altimetria e microclima da área onde o posto encontra-se instalado.

Os arquivos serão convertidos, então, para o formato .tif e recortados para os limites da área de estudo, passando por processo de reclassificação onde foram definidas 10 classes referentes ao mapeamento climático da cidade de São Paulo proposto por Armani e Tarifa (2001). A avaliação das interpolações foi realizada por meio de validação cruzada, onde foram calculados o erro médio absoluto (EM) e a raiz do erro quadrático médio (REQM), metodologia utilizada para avaliar o grau de semelhança entre previsão e observação, conforme disposto por Meira (2010):

$$EM = \frac{1}{n} \sum (Te - To) \quad (10)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Te - To)^2} \quad (11)$$

Onde To corresponde à temperatura observada ($^{\circ}C$); Te à temperatura estimada ($^{\circ}C$); e n ao número de postos de monitoramento. Os cálculos foram realizados em planilhas eletrônicas do Microsoft Excel 2013® e do R-Project 4.0.2, bem como cálculos de média simples para os valores de temperatura do ar, umidade relativa do ar e pluviosidade e o desvio padrão, a variação, a regressão e o coeficiente de correlação de Perason entre Tar e TST.

Os valores finais utilizados para os cálculos realizados no Excel foram obtidos a partir da média simples dos valores de entrada das 13:00 e das 13:10 fornecidos pelo CGE, pois, uma vez que a cena capturada pelo satélite deu-se as 13:04, a melhor metodologia para estabelecer a temperatura ar, umidade relativa do ar e pluviosidade do instante da cena do satélite, é a média entre o instante anterior e o instante posterior registrados nas estações meteorológicas CGE. Desta forma, para cada uma das 29 estações meteorológicas do CGE foi estabelecido novos valores categorizados como: temperatura do ar média estimada do instante, umidade relativa do ar média estimada do instante e pluviosidade média estimada do instante.

Após análise estatística, serão comparados os valores medidos e os valores médios estimados em cada uma das 29 estações automáticas do CGE dentro da cidade de São Paulo (os pontos de monitoramento Riacho Grande,

Mauá- Paço Municipal e Santana do Parnaíba localizam-se fora da área de estudo), identificando presença ou ausência de alterações nos dados obtidos nos diferentes métodos de espacialização, os quais serão subdivididos qualitativamente em: : $-1,5 \leq x \leq 1,5$ como Muito Baixo; $-1,5 > x \geq -2,5$ e $1,5 < x \leq 2,5$ como Baixo; $-2,5 > x \geq -3,5$ e $2,5 < x \leq 3,5$ como Médio; $-3,5 > x \geq -5,5$ e $3,5 < x \leq 5,5$ como Alto; e, por fim, $-5,5 > x$ e $x > 5,5$ como Muito Alto. Tais intervalos foram definidos a partir da publicação “Climatologia das temperaturas mínimas e probabilidade de ocorrência de geado no Estado do Rio Grande do Sul”, elaborada por Oliveira (1997), na qual estabelece uma média de $-3 > x > 3$ °C entra a diferença da Tar e da TST para que se tenha resultados satisfatórios à pesquisa científica.

Por fim, a modelagem espacial dos dados de temperatura do ar foi realizada a partir da ferramenta de análise geoestatística do ArcMap 10.3.1, na opção de Krigagem/Cokrigagem¹⁸, na qual foram inseridos valores do instante da temperatura do ar, da pluviosidade e da umidade relativa do ar¹⁹ e o valor de altitude ao solo da posição de cada uma das estações. Os valores de altitude foram extraídos do software *Google Earth Pro*, a partir do arquivo de localização fornecido pelo CGE²⁰.

¹⁸ A cokrigagem é um procedimento geoestatístico segundo o qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, com base na correlação espacial entre si. É uma extensão multivariada do método da krigagem quando para cada local amostrado obtém-se um vetor de valores em lugar de um único valor. A cokrigagem, procura minimizar a variância dos erros de estimativas, explorando a correlação cruzada entre diversas variáveis, ou seja, as estimativas são feitas com base nos variogramas cruzados efetuados entre as variáveis de interesse.

¹⁹ Os valores do instante foram calculados a partir da média simples dos valores observados às 13:00 e às 13:10.

²⁰ Os valores de altitude não estão exatos, uma vez que os valores extraídos do *Google Earth Pro* são com o ponto fixo no solo. O CGE não detém dados da altura de instalação de cada estação meteorológica, isto é, altura das edificações, pontes, etc aonde as estações foram instaladas.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

O mapa referente a espacialização do uso e cobertura do solo pode ser observado na figura 7, no qual identificou-se dois níveis de densidade de ocupação urbana e dois níveis de densidade da cobertura vegetal do solo, além de superfícies líquidas e solo exposto.

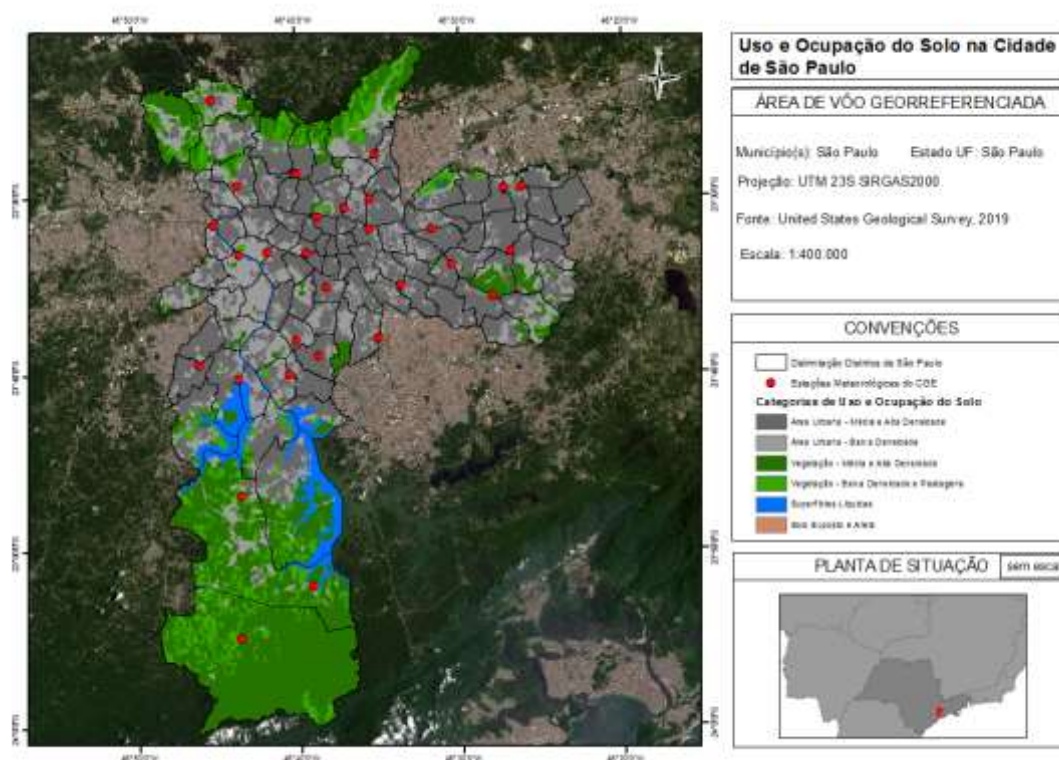


Figura 7 - Uso e ocupação do solo na cidade de São Paulo em 2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

A partir da disposição das categorias de uso e ocupação do solo mapeadas, pode-se perceber a existência de áreas com alta cobertura vegetal na região Sul e Norte da cidade de São Paulo, sendo, respectivamente, Parque Estadual da Serra do Mar e o Parque Estadual da Cantareira. A zona urbana concentra-se entre os Parques Estaduais presentes nas extremidades do município, estendendo-se, também, à Zona Leste.

Referente a área urbanizada, nota-se uma menor densidade de urbanização: no eixo oeste-sul, referente aos distritos de Santo Amaro, Morumbi, Butantã, Alto de Pinheiros, Vila Sônia, Campo Belo, Moema, Saúde e Cursino;

em uma faixa que separa o centro antigo do extremo leste da cidade, composta pelos distritos da Penha, Tatuapé, Carrão e Mooca; e em duas áreas da Zona Norte próximas ao Parque Estadual da Cantareira, compreendendo os distritos de Tremembé e Tucuruvi à Nordeste e Perus, Anhanguera e Jaraguá à Noroeste. Os distritos com uma elevada densidade de urbanização foram, na Zona Leste: Itaim Paulista, Vila Curuçá, Lajeado, Guaianases, Itaquera, Arthur Alvim, Vila Matilde, São Miguel, Vila Jacuí, São Mateus, Sapopemba, São Lucas, Aricanduva, Ponte Rasa e Ermelino Matarazzo; na Zona Norte: Freguesia do Ó, Brasilândia, Cachoeirinha, Mandaqui, Casa Verde e Limão; na Zona Oeste: Jaguará, Lapa, Vila Leopoldina, Barra Funda e Perdizes; na Zona Sul: Jabaquara, Cidade Ademar, Sacomã, Capão Redondo, Campo Limpo e Jardim São Luís. Além, é claro, da região denominada centro estendido.

Quanto a temperatura de superfície, pode-se observar os resultados obtidos nas figuras 8 e 9, referentes a dois períodos distintos da normal climatológica da cidade de São Paulo

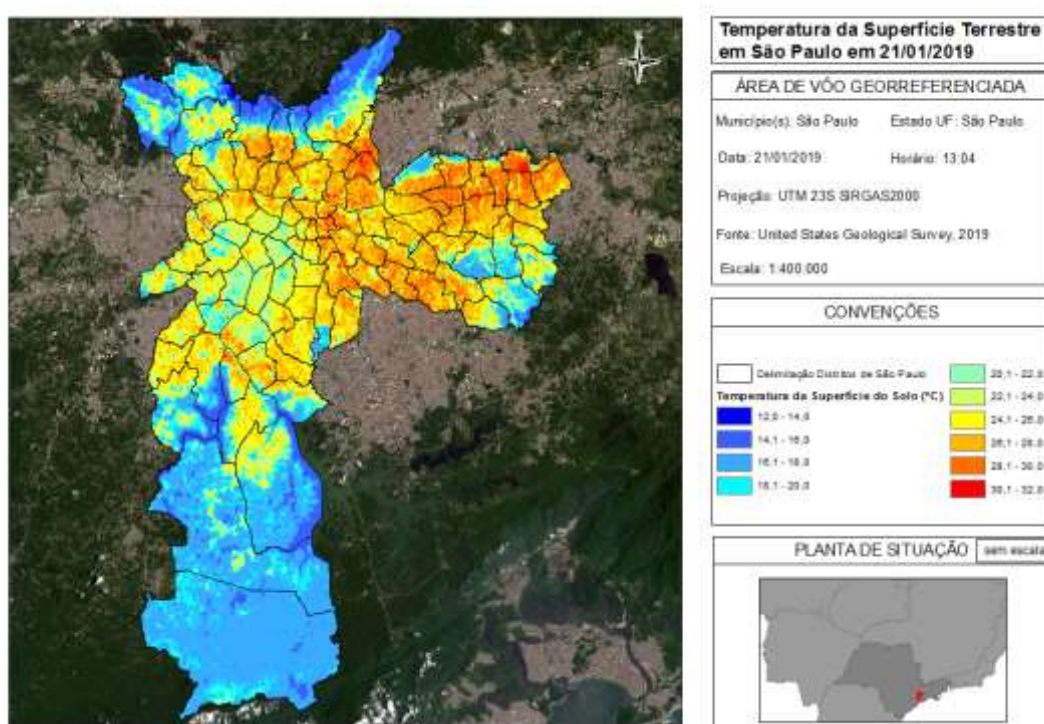


Figura 8 - Temperatura da Superfície Terrestre em São Paulo em 21/01/2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

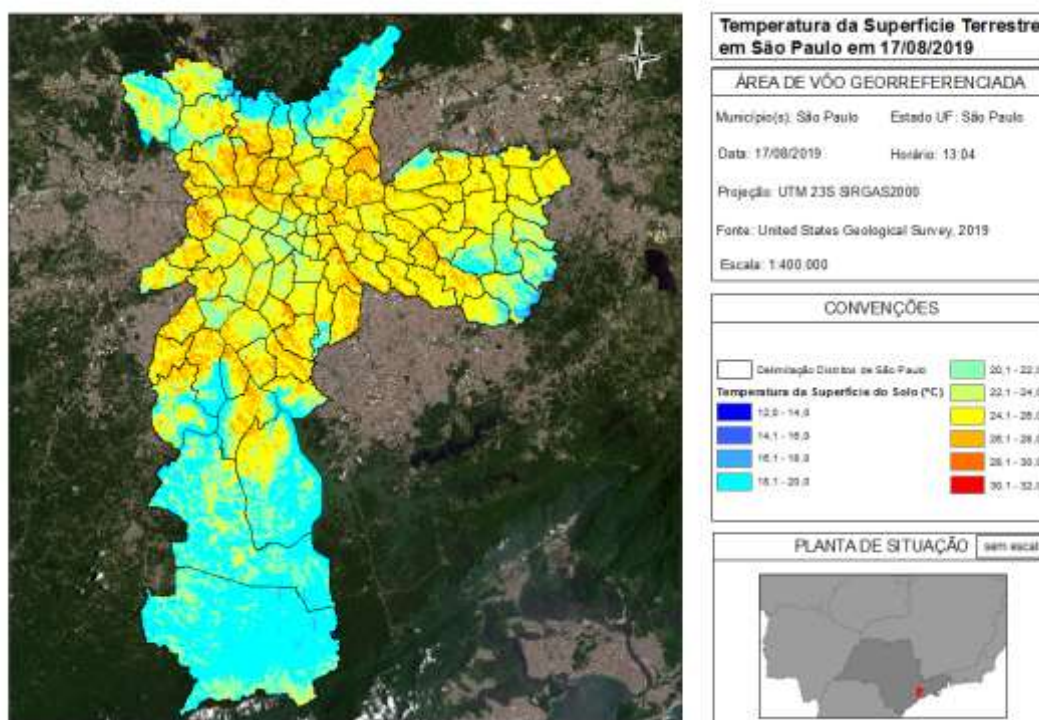


Figura 9 - Temperatura da Superfície Terrestre em São Paulo em 17/08/2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020

De acordo com Tarifa,

“os múltiplos de diversos aspectos, propriedades, graus de intensidade do fenômeno metropolitado redefine globalmente todo o conjunto de suas partes constituintes [...] o clima ou os climas urbanos da metrópole não podem ser tratados como processos puramente físicos, mas em todas as suas interações com os fatos associados à produção do espaço através das práticas sociais vigentes no cotidiano desta sociedade urbana.” (p.1, 2001)

Desta forma, é nítida a relação entre as categorias de uso e ocupação do solo, especializadas na figura 2, com a temperatura da superfície terrestre em ambos períodos da normal climatológica: as áreas com uma maior densidade de ocupação urbana apresentam temperaturas mais altas, seguidas pelas áreas de baixa densidade de ocupação urbana e de cobertura vegetal baixa/pastagens; enquanto as áreas com alta cobertura vegetal e as superfícies líquidas (rios, lagos, córregos, represas, etc.) apresentam temperaturas mais baixas.

No entanto, a região do centro estendido no eixo centro-oeste-sul, apesar de possuir uma alta densidade de ocupação urbana, como nos casos dos distritos de Perdizes, Consolação, Jardins, Pinheiros, Paulista, Vila Mariana, Ipiranga, apresenta temperaturas amenas e homogêneas em ambas os

períodos. Além disso, no período compreendido como primavera-verão há uma maior amplitude térmica na cidade, sendo as áreas periféricas de alta densidade de urbanização as mais afetadas com o aumento de temperatura – visto que as áreas nobres, embora possam vir a possuir uma alta densidade urbana, não apresentam um visível aumento de temperatura entre os períodos de primavera-verão e outono-inverno.

Indo além, ao compararmos o presente mapeamento da temperatura da superfície do solo com o realizado no Atlas do Meio Ambiente de 2001, pela Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente, anexo B, é possível verificar que o eixo centro-oeste-sul, composto pelos bairros nobres citados anteriormente, mantêm suas temperaturas amenas desde os anos de 1999/2000, enquanto a mancha da ilha de calor urbana vem expandindo-se à Zona Leste, à Zona Norte e à Zona Sul, invadindo, por vezes, áreas que anteriormente pertenciam aos Parques Estaduais, as Áreas de Proteção Permanente (APP) e as Áreas de Proteção Ambiental (APA).

Assim, a urbanização e a expansão periférica, produz microclimas à cidade a partir das diferentes técnicas e tecnologias empregadas: presença de massas de edificações, materiais impróprios às construções civis e vias públicas que absorvem grande quantidade de radiação solar, redução da velocidade do ventos e alteração de sua direção por prédios, torres e outros edifícios, poluição que reduz a perda de radiação de onda longa das superfícies ao céu, sistema de captação de águas pluviais com drenagem insuficiente, utilização de revestimentos impermeáveis no solo e a redução da energia utilizada nos processos de evapotranspiração realizados pela vegetação (BERNATZKY, A., 1982). As áreas verdes, por sua vez, são concentradas em poucas áreas, apresentando efeitos locais, ao invés de serem distribuídas proporcionalmente pelo espaço construído.

7.2 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E TEMPERATURA DO AR

A temperatura do ar foi obtida a partir das 29 estações meteorológicas do CGE dentro da cidade de São Paulo. A partir das medições, que são feitas de 10 em 10 minutos, foi obtida a média do instante horário pelo qual as imagens do satélite *Landsat-8* foram obtidas, isto é, a média a temperatura das 13:00 horas e das 13:10 horas, de cada uma das estações. Desta forma, pode-se cruzar os dados da temperatura da superfície do solo, obtida através da fotogrametria das imagens de satélite, com os dados obtidos pelo CGE conforme a figura 5 e 6.

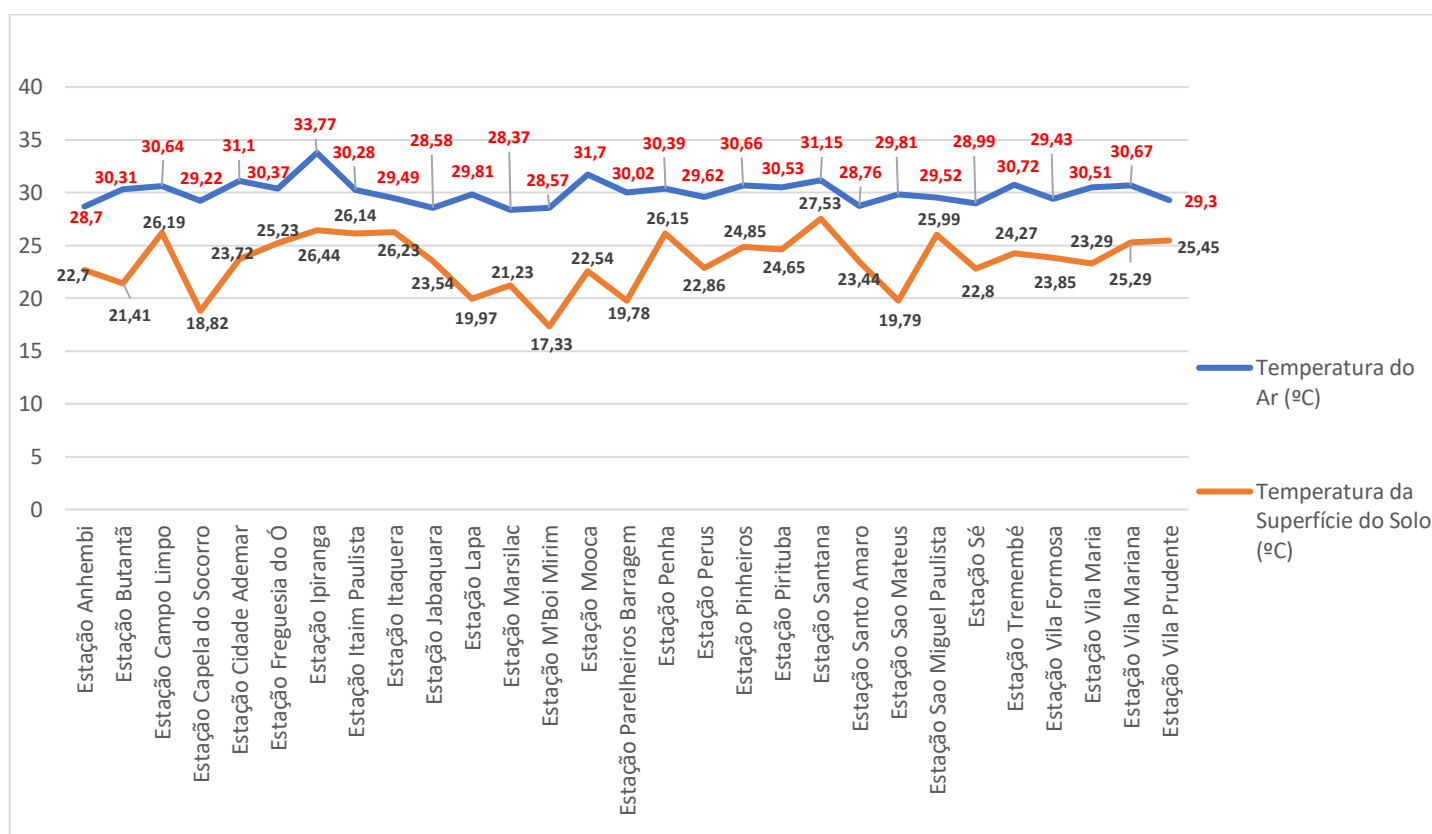


Figura 10 - Gráfico da temperatura do ar pela temperatura da superfície do solo em cada uma das estações meteorológicas do CGE as 13:04 de 21/01/2019. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

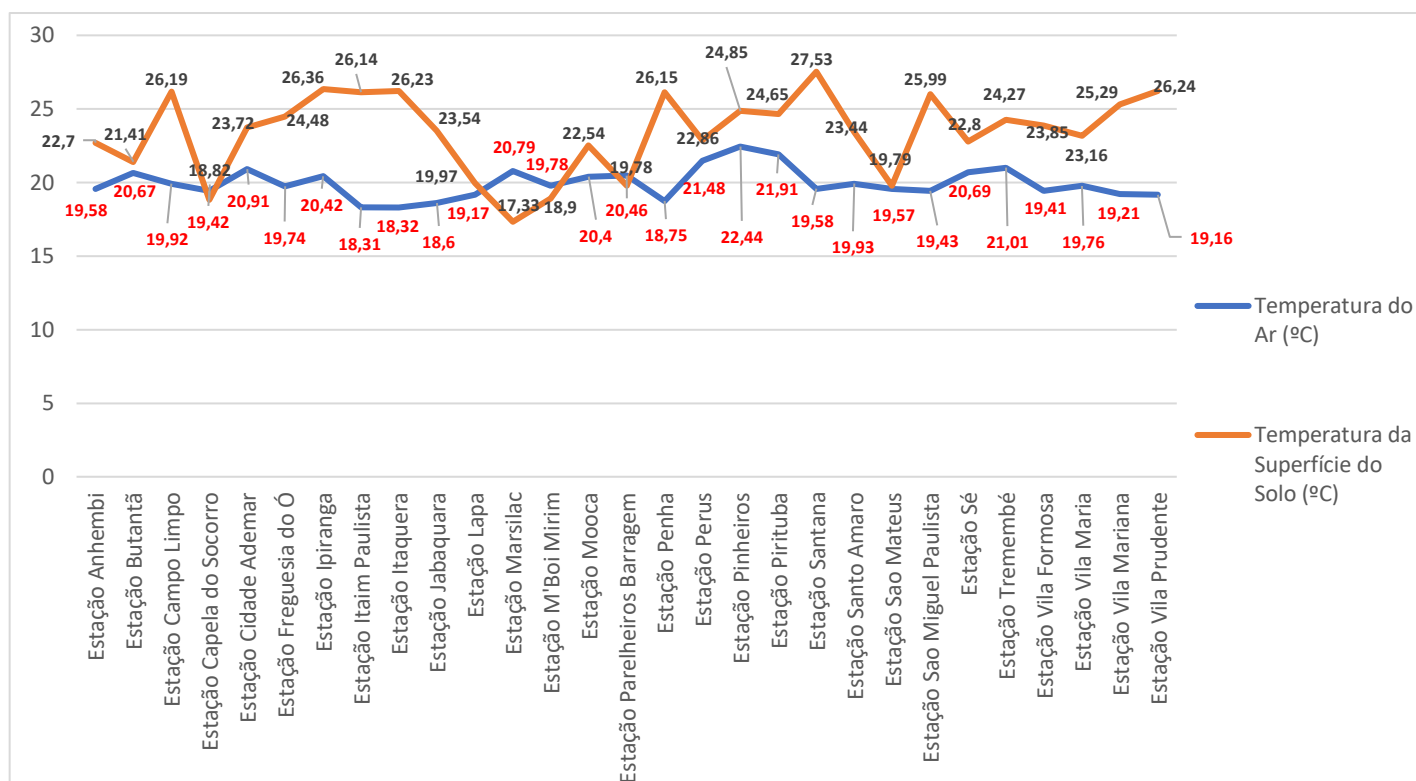


Figura 11 - Gráfico da temperatura do ar pela temperatura da superfície do solo em cada uma das estações meteorológicas do CGE as 13:04 de 17/08/2019. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

É nítida a influência da classificação do uso e cobertura do solo e na emissividade dos materiais utilizadas para os cálculos da temperatura de superfície do solo, uma vez que a variação das temperaturas obtidas segue a mesma linha de tendência em ambas as datas. Apresentam temperaturas mais elevadas nas estações Campo Limpo, Penha, Santana, São Miguel Paulista e Vila Prudente; temperaturas mais baixas nas estações Capela do Socorro, Marsilac, Parelheiros/Barragem e São Mateus; além disso em ambos os gráficos pode-se ver uma variação de temperatura em parábola da estação Cidade Ademar até a Estação Jabaquara. No entanto, enquanto no período da primavera-verão todos os valores estimados permaneçam abaixo dos valores observados, no período outono-inverno não se tem a mesma homogeneidade inversa, visto que embora a maioria dos valores estimados estejam acima dos valores observados, as estações de Capela do Socorro, M'Boi Mirim, Parelheiros/Barragem e Marsilac apresentam valores estimados abaixo dos valores observados.

Já a temperatura do ar, embora apresente correlação entre os períodos estabelecidos, possui uma linha de tendência diferente, uma vez que há outras variáveis em sua medição além das categorias de uso e cobertura do solo (direção e velocidade do vento, umidade e pluviosidade, principalmente), embora, estas, tenham importância significativa nos resultados, visto que as estações meteorológicas do CGE não cumprem os critérios estabelecidos pelo INMET²¹: local plano para evitar o acúmulo de água e longe de instalações elétricas; horizontes amplos, sem barreiras que impeçam a radiação solar ou mudem as características do vento; distância de cursos d'água; solo gramado ou com vegetação rasteira. Estas estão espalhadas pela cidade nos mais diversos tipos de terrenos: sobre superfícies líquidas, sobre concreto, sobre asfalto, sob vegetação densa, etc e isto afeta negativamente a confiabilidade, eficiência e fidelidade de seus resultados.

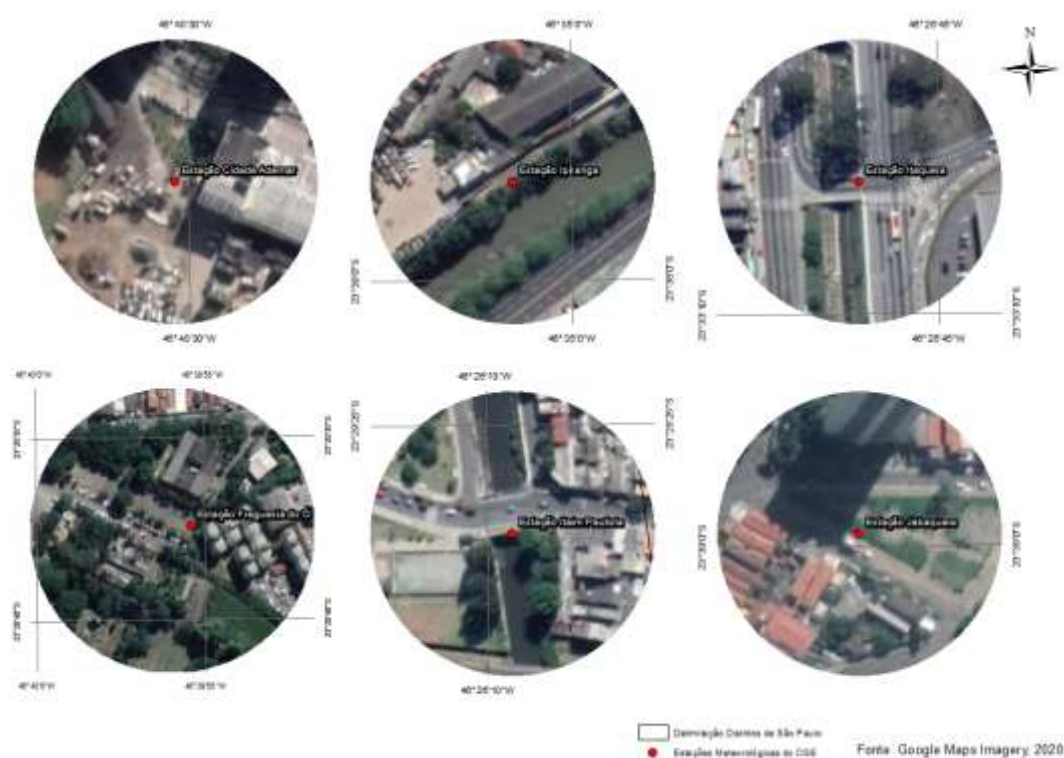


Figura 12 - Visualização aérea da cidade de São Paulo sobre as estações do CGE em escala de 1:1500. Fonte: Google Maps Imagery, 2020. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

²¹ As fotografias de campo de cada uma das 29 estações abordadas no presente trabalho podem ser conferidas no anexo C. Estas foram coletadas por Rodolfo Alves ao longo dos anos de 2017 a 2019 e compartilhadas pelo blog Abaixo de Zero, uma vez que a condição sanitária e pandêmica que nos encontramos na atual conjuntura tenha impedido um trabalho de campo pessoal. Contudo, foi utilizado tanta a ferramenta do Google Streetview para conferir se a situação do sítio de posição das estações meteorológicas permanecia o mesmo e, nas que foram possível tal aferição, assim a fez.

A partir da figura 12 vê-se a situação da posição das estações Cidade Ademar, Freguesia do Ó, Ipiranga, Itaim Paulista, Itaquera e Jabaquara, que nas figuras 10 e 11 apresentam uma linha de tendência da TST em formato de parábola, a partir das ortofotos do Google Maps que possui resolução espacial melhor que as ortofotos com pixel de 15 metros do Landsat-8. Vemos que tais estações estão posicionadas em regiões urbanas, contudo, sobre áreas verdes, na sombra de árvores ou superfícies líquidas, ou seja, a temperatura da superfície do solo, a umidade e a incidência da radiação solar tiveram interferências antes de serem observadas pela estação meteorológica. Além disso, o pixel de 15 metros da banda pancromática do sensor OLI, o pixel de 100 metros das bandas termais do sensor TIRS do Landsat-8 e a classificação do uso e ocupação do solo realizada provocaram grandes generalizações em tais áreas, sendo estas interpretadas áreas urbanas e tendo valores térmicos respectivos as áreas de concreto e asfalto que circundam as áreas verdes e superfícies líquidas em questão.

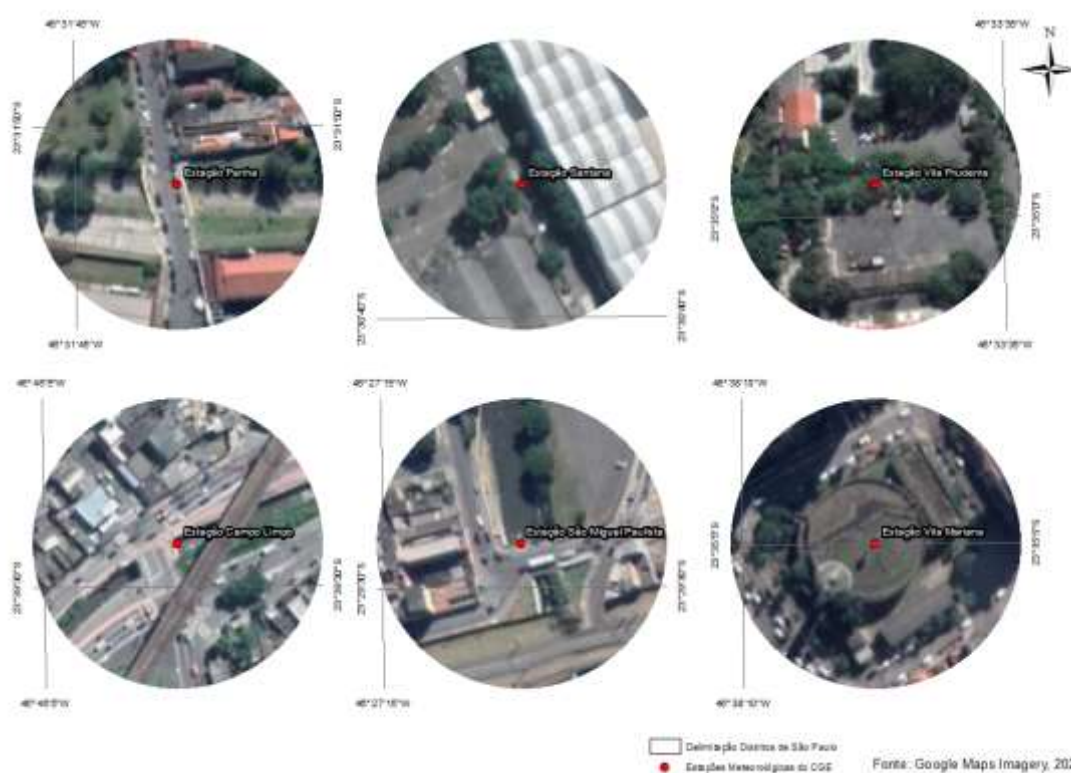


Figura 13 - Visualização aérea da cidade de São Paulo sobre as estações do CGE em escala de 1:1500. Fonte: Google Maps Imagery, 2020. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

A figura 13 destaca outros pontos que apresentaram grande diferença entre Tar e TST, estas são as estações: Penha, Campo Limpo, Santana, São Miguel Paulista, Vila Prudente e Vila Mariana. Tem-se, aqui, a mesma relação identificada na figura 12, as estações meteorológicas do CGE foram posicionadas em áreas verdes ou superfícies líquidas as margens de regiões consideravelmente urbanizadas, permitindo o erro advindo da resolução espacial e da classificação do uso e cobertura do solo.

Analisando as correlações dos valores de temperatura de ambos as datas, vê-se que durante o período primavera-verão, os dados de temperatura da superfície do solo encontram-se abaixo dos valores da temperatura do ar, enquanto no período outono-inverno os valores de temperatura de superfície do solo em alguns pontos encontram-se acima e em outros abaixo da temperatura do ar. A partir dos gráficos de dispersão de ambas as datas, conforme a figura 14 e 15, pode-se analisar outras informações sobre a correlação dos dados.

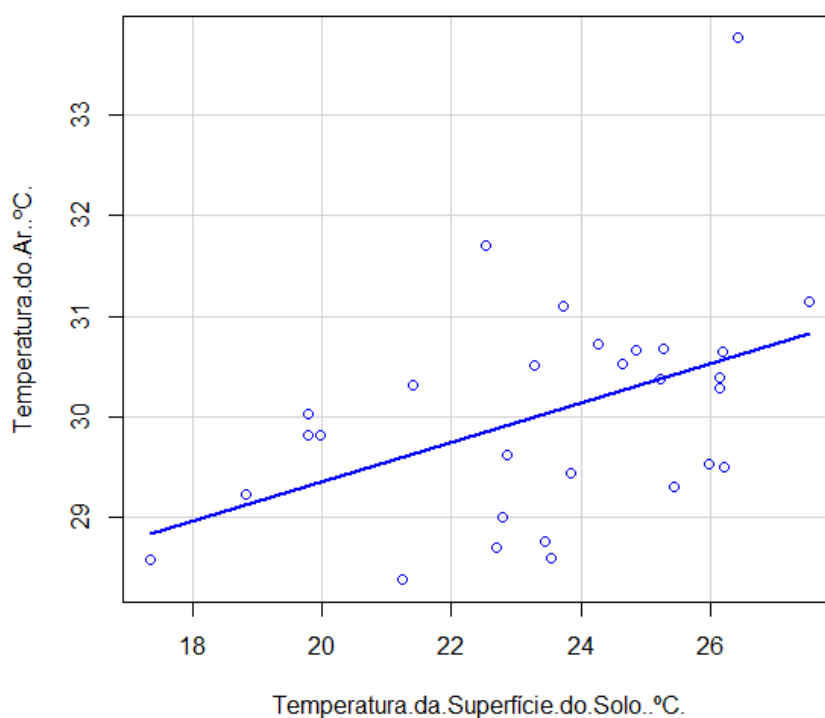


Figura 14 - Diagrama de dispersão da temperatura da superfície do solo com a temperatura do ar em São Paulo em 21/01/2019. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020

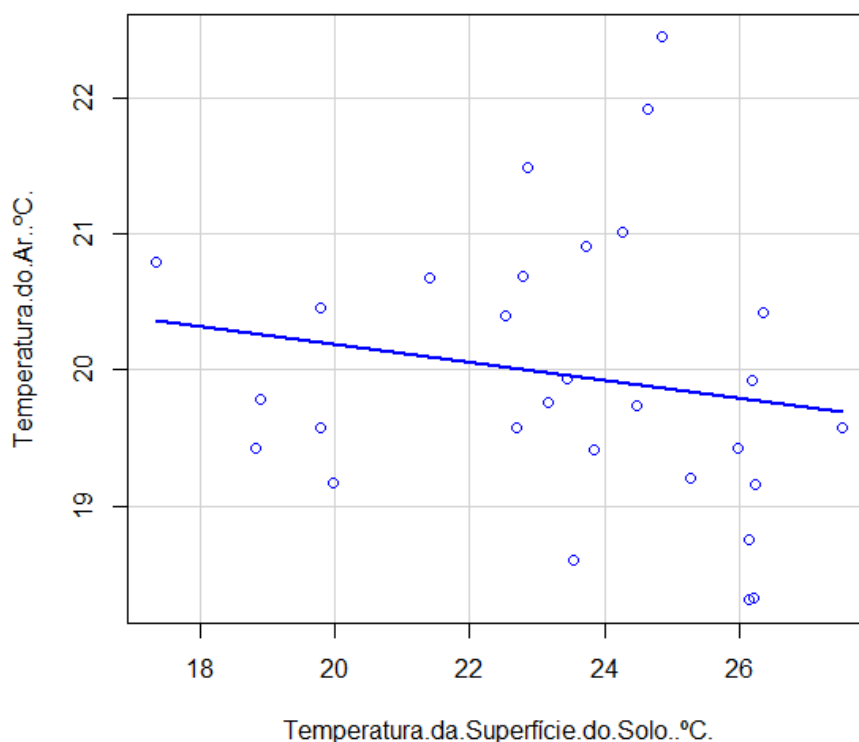


Figura 15 - Diagrama de dispersão da temperatura da superfície do solo com a temperatura do ar em São Paulo em 17/08/2019. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

A partir dos valores do coeficiente de correlação de Pearson²² afirma-se que em 21/01/2019, 95% dos valores coletados de Tar e TST estão encontradas num intervalo de correlação de 0,096 a 0.698, com uma correlação linear média de 0.446. Na data 17/08/2019, 95% dos valores coletados de Tar e TST estão encontradas num intervalo de correlação de -0.51 e 0.202, com uma correlação linear média de -0.176. Desta forma, vê-se que, apesar dos valores de TST obtidos no período de outono-inverno serem mais próximos dos valores de Tar há uma correlação linear bem baixa entre eles, enquanto no período da primavera-verão, embora a diferença entre TST e Tar seja mais expressiva, há uma correlação média entre os dados. É possível observar tal correlação para os gráficos da figura 10 e 11, na qual a figura 10 a TST permanece inferior a Tar em todos os pontos medidos e a figura 11 varia entre superior e inferior em diversos pontos, não tenho linearidade alguma.

²² Importante ressaltar que o coeficiente de correlação de Pearson é um método estatístico para avaliar duas variáveis por uma correlação linear e quantitativa, com valores sempre entre -1 e 1. O sinal indica se a correlação é positiva ou negativa, e o tamanho da variável indica a força da relação, isto é, quanto mais próximo de zero menor é a correlação linear entre as duas variáveis.

Por fim, tem-se os valores do erro médio absoluto²³, da raiz do erro quadrático médio²⁴ da temperatura estimada pela temperatura observada, assim como a média da diferença entre a TST e a Tar e o desvio padrão por cada uma das 29 estações meteorológicas do CGE em ambas datas analisadas, como vê-se nas tabelas 5 e 6.

Tabela 6 - Valores de erro médio absoluto e da raiz do erro quadrático médio para o dia 21/01/2019. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

Nome	JANEIRO		
	Erro Médio Absoluto	Raiz do Erro Quadrático Médio	Diferença (°C)
Estação Anhembi	-3,57	5,048742418	-7,14
Estação Sé	-5,62	7,947880221	-11,24
Estação Vila Mariana	-2,52	3,563818177	-5,04
Estação Ipiranga	-3	4,242840887	-6
Estação Campo Limpo	-2,66	3,761808076	-5,32
Estação M'Boi Mirim	-3,095	4,376990976	-6,19
Estação Santo Amaro	-5,2	7,353910524	-10,4
Estação Cidade Ademar	-1,925	2,722361108	-3,85
Estação Jabaquara	-2,79	3,945655839	-5,58
Estação Capela do Socorro	-1,63	2,305168107	-3,26
Estação Parelheiros Barragem	-1,765	2,496086938	-3,53
Estação Mooca	-3,38	4,780041841	-6,76
Estação Penha	-4,92	6,957930727	-9,84
Estação São Miguel Paulista	-5,01	7,085209947	-10,02
Estação Itaim Paulista	-5,12	7,240773439	-10,24
Estação Itaquera	-2,07	2,927422074	-4,14
Estação São Mateus	-4,45	6,293250353	-8,9
Estação Vila Formosa	-2,57	3,634528855	-5,14
Estação Vila Prudente	-2,12	2,998132752	-4,24
Estação Perus	-3,61	5,10531096	-7,22
Estação Pirituba	-2,94	4,157787873	-5,88
Estação Freguesia do Ó	-2,225	3,146825176	-4,45
Estação Tremembé	-2,905	4,108290399	-5,81
Estação Vila Maria	-2,69	3,804234483	-5,38
Estação Santana	-3,225	4,560838739	-6,45
Estação Lapa	-3,69	5,218448045	-7,38
Estação Pinheiros	-1,81	2,559726548	-3,62
Estação Butantã	-4,58	6,477098116	-9,16
Estação Marsilac	-3,665	5,183092708	-7,33
	Varição	Média	Desvio Padrão
	5,309611576	-6,534827586	2,304259442

²³ O erro médio absoluto é uma medida de erros entre observações pareadas que expressam o mesmo fenômeno, muito utilizado para estimar o erro em séries temporais. Sua eficácia é dada uma vez que expressa os erros individuais ao quadrado.

²⁴ O erro quadrático médio é utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, apresentando os resultados nas mesmas dimensões das variáveis analisadas.

Tabela 7 - Valores de erro médio absoluto e da raiz do erro quadrático médio para o dia 17/08/2019. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento, 2020.

Nome	AGOSTO		
	Erro Médio Absoluto	Raiz do Erro Quadrático Médio	Diferença (°C)
Estação Anhembi	1,56	2,206173157	3,12
Estação Sé	1,055	1,491995308	2,11
Estação Vila Mariana	3,04	4,29920923	6,08
Estação Ipiranga	2,97	4,20021428	5,94
Estação Campo Limpo	3,135	4,433559518	6,27
Estação M'Boi Mirim	-0,44	0,622253967	-0,88
Estação Santo Amaro	1,755	2,481944802	3,51
Estação Cidade Ademar	1,405	1,988970055	2,81
Estação Jabaquara	2,47	3,493107499	4,94
Estação Capela do Socorro	-0,3	0,424264069	-0,6
Estação Parelheiros Barragem	-0,34	0,480832611	-0,68
Estação Mooca	1,07	1,513208512	2,14
Estação Penha	3,7	5,232590181	7,4
Estação São Miguel Paulista	3,28	4,638620485	6,56
Estação Itaim Paulista	3,915	5,536646097	7,83
Estação Itaquera	3,955	5,593214639	7,91
Estação São Mateus	0,11	0,155563492	0,22
Estação Vila Formosa	2,22	3,139554108	4,44
Estação Vila Prudente	3,54	5,006316011	7,08
Estação Perus	0,69	0,975807358	1,38
Estação Pirituba	1,37	1,93747258	2,74
Estação Freguesia do Ó	2,37	3,351686143	4,74
Estação Tremembé	1,63	2,305168107	3,26
Estação Vila Maria	1,7	2,404163056	3,4
Estação Santana	3,975	5,62149891	7,95
Estação Lapa	0,4	0,565685425	0,8
Estação Pinheiros	1,205	1,704127343	2,41
Estação Butantã	0,37	0,523259018	0,74
Estação Marsilac	-1,73	2,446589463	-3,46
	Variação	Média	Desvio Padrão
	6,300426801	3,84137931	2,510065059

Na maior parte das amostras a TST foi, em média 6,53 °C inferior na primavera-verão e 3,84 °C superior no outono-inverno, isto significa que, soma ao desvio padrão de 2,3 em janeiro e de 2,5 em agosto, a média das amostras analisadas podem vir a ter uma grande diferença entre resultados, maior do que a diferença proposta por Oliveira (1997), que é uma diferença média estabelecida entre $-3 > x > 3$ °C entre Tar e TST, em sua tese sobre geadas no Rio Grande do Sul. É importante destacar, novamente, que a TST obtida em janeiro tem diferenças negativas em relação a Tar, isto é, todos os valores de temperatura da superfície terrestre obtidos pelo satélite foram inferiores a temperatura do ar obtidos pelo CGE. Enquanto no período de agosto, as diferenças foram mais heterogêneas, em algumas estações os valores da TST

foram superiores aos valores da Tar e em outras os valores da TST foram inferiores aos valores da Tar.

Desta forma, considerando nossa classificação qualitativa (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto), no mês de janeiro observa-se que a Estação Capela do Socorro com uma variação entre Tar e TST classificada como média; as estações Vila Mariana, Campo Limpo, Cidade Ademar, Parelheiros Barragem, Itaquera, Vila Formosa, Vila Prudente, Freguesia do Ó, Vila Maria e Pinheiros classificadas como Alta; e o restante foram classificadas como Muito Altas.

Já a data estabelecida em agosto apresenta melhores resultados, sendo: as estações M'Boi Mirim, Capela do Socorro, Parelheiros-Barragem, São Mateus, Perus, Lapa e Butantã foram classificadas como Muito Baixa; as estações Sé, Mooca e Pinheiros como Baixa; as estações Anhembi, Cidade Ademar, Pirituba, Tremembé, Vila Maria e Marsillac como Médio; as estações Santo Amaro, Jabaquara, Vila Formosa e Freguesia do Ó como Alta; e as demais estações como Muito Alta. Percebe-se que, comparando qualitativamente os resultados, na maioria das estações meteorológicas, os resultados de TST obtidos em agosto foram mais próximos dos resultados de Tar, contudo, nas estações de Vila Mariana, Campo Limpo, Itaquera e Vila Prudente os resultados em 17/08/2019 foram piores do que os emitidos em 21/01/2019, passando de uma diferença alta em janeiro para uma diferença muito alta em agosto.

7.3 MODELAGEM ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR: COKRIGAGEM

A partir da média do instante dos dados de temperatura do ar, precipitação, umidade relativa do ar e elevação/altitude, foram gerados mapas a partir do método de Cokrigagem, uma respectivo a cena do dia 21/04/2019 as 13:04 e outro respectivo a cena do dia 17/08/2019 as 13:04. A partir dos resultados obtidos pode-se observar que as temperaturas, em ambas as datas, possuem um amplitude térmica bem menor que o mapeamento da TST, assimilando-se mais ao dados pontuais de Tar, contudo, ainda é possível observar inúmeras similaridades entre a espacialização da TST com a modelagem espacial da Tar.

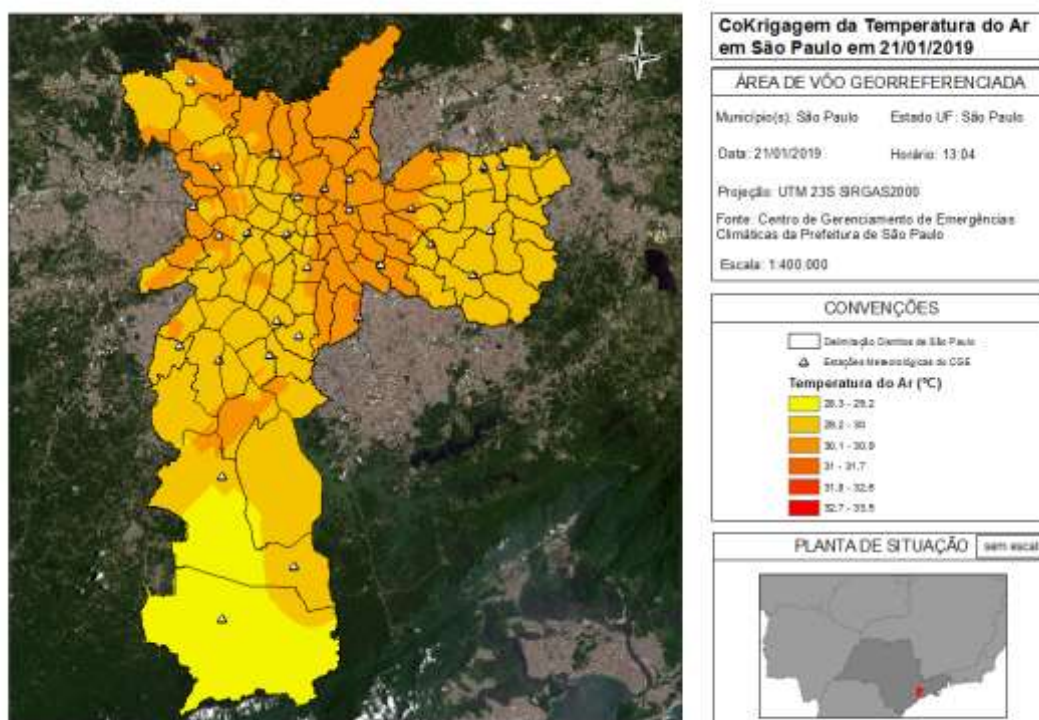


Figura 16 - Mapa de Cokrigagem com dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pluviosidade e elevação para o dia 21/01/2019 às 13:04. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento

No período primavera-verão, a nítida a temperatura mais elevada ao Sul do município, região que abriga o Parque Estadual da Serra do Mar, pertencente aos distritos de Marsilac e Parelheiros, contudo, não vemos a mesma projeção na Serra da Cantareira, na Zona Norte, muito provavelmente porque os dados utilizados na modelagem espacial encontravam-se inteiramente nas zonas urbanas e mais quentes. Além disso, a presença de três arcos concêntricos: o primeiro, localizado no Zona Oeste, sobre os distritos de Raposo Tavares, Rio Pequeno, Jaguaré, Vila Leopoldina, Jaguará e São Domingos, apresenta temperaturas mais elevadas, de 30.1 a 30.9 °C; o segundo, de eixo Noroeste-Centro-Sudoeste, apresenta temperatura mais amenas em relação às suas periferias, sendo beneficiado pelo verde da Serra da Mantiqueira, na altura do Pico do Jaraguá, ao Norte, pela extensa verticalização e projeção de sombras dos “arranha-céus” do centro novo²⁵ e pelos bairros nobres e arborizados ao Sul;

²⁵ Por centro novo entende-se, aqui, a nova centralidade surgida, desde a década de 90, com a construção da avenida paulista e posteriormente expandida através da linha amarela do metrô.

por fim, o terceiro arco apresenta eixo Norte-Centro-Leste, com temperaturas mais elevadas, sendo a área ao norte, desconsiderando a Serra da Cantareira, distritos periféricos, como Cachoeirinha, Brasilândia, Jaçanã, a região central é caracterizada pelo centro velho e estendido, como Sé, Pari e Brás e a região Leste é caracterizada pela expansão urbana para o além do Tamanduateí, com altíssima densidade de pessoas e porcentagem muito pequena de áreas verdes, nos distritos de Tatuapé, Mooca, Água Rasa, etc.

Por fim, tem-se, também, duas áreas de temperaturas mais amenas: a região periférica da Zona Sul, que embora tenham características propícias para uma elevada temperatura, ainda beneficia-se do verde da Serra do Mar; e o extremo Leste, que, apesar da teoria de Armani e Tarifa, apresentada no Atlas Ambiental do Município de São Paulo, e da TST, apresenta temperaturas menos elevadas em comparação com o entorno. Essa incoerência teórica e metodológica acredito que se deva ao posicionamento das estações meteorológicas, ora sobre superfícies aquáticas, hora sob árvores ou devido a influência da Área de Proteção Ambiental Parque e Fazenda do Carmo na interpolação dos dados à modelagem espacial.

Os valores do período outono-inverno possuem, novamente, maior concordância com a teoria e com os demais resultados obtidos.

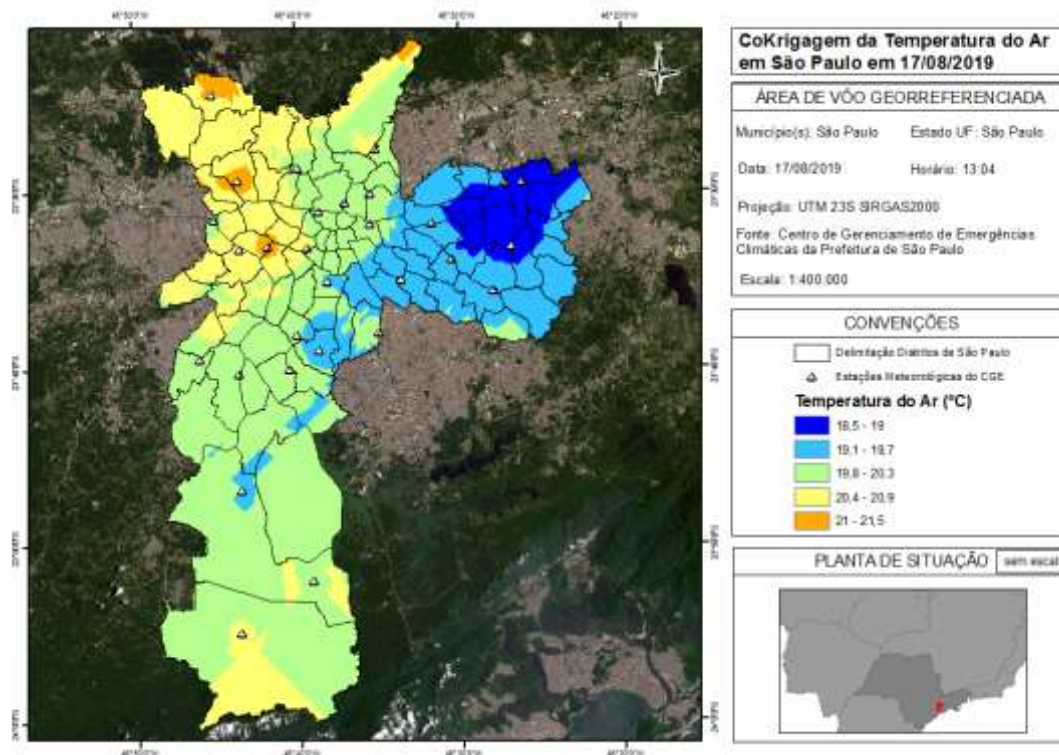


Figura 17 - Mapa de Cokrigagem com dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pluviosidade e elevação para o dia 17/08/2019 as 13:04. Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo, 2019. Elaborado por: Augusto Nascimento

Há a presença de três zonas, não mais configurada na forma de anéis concêntricos, mas eixos diagonais. A primeira, abrangendo a região Noroeste-Oeste, com temperaturas de 10,4 a 215 °C e, novamente, posicionando temperaturas mais elevadas na região da Serra da Cantareira e Pico do Jaraguá, devido a falta de estações na região e as altas temperaturas observadas nas regiões adjacentes; a segunda, com um eixo posicionado no Nordeste-Centro-Sudoeste, com temperaturas intermediárias, de 19,8 a 20,3 °C; a terceira zona é posicionada no extremo leste, expandindo-se até o sudeste, apresentando as temperaturas mais baixas, de 18 a 19,7 °C. Comparando este último caso com a TST obtida, vê-se que, neste último, também há manchas de baixas temperaturas na região, embora que parcialmente suprimidas pelo entorno; evocando a bibliografia utilizada, as temperaturas mais baixas na região periférica do extremo leste tem razão, uma vez que se configuram como “unidades climáticas extremas, [...] ora calor insuportável, ora frio demais” (SMVA/PMSP, 2002).

8 CONCLUSÕES

A partir das cenas extraídas do Landsat-8, dos dados disponibilizados pelo CGE, das técnicas e softwares de geoprocessamento, sensoriamento remoto e estatística, modelos matemáticos e geoestatísticos e análise estatística foi possível estimar a temperatura de superfície terrestre de parte do município de São Paulo em 21/01/2019 (data respectiva representativa do período primavera-verão da normal climatológica) e em 17/08/2019 (data respectiva representativa do período outono-inverno da normal climatológica), interpolar espacialmente os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e altitude e comparar os valores e resultados entre si, com os resultados oficiais do CGE e com a teoria climática consolidada para o município de São Paulo a partir do Atlas Ambiental do Município de São Paulo.

As duas espacializações de temperatura indicaram um padrão de distribuição espacial da temperatura – do ar e da superfície terrestre – semelhantes, visto que: a ocorrência de temperaturas baixas ou amenas em regiões classificadas como Vegetação – Média e Alta Densidade e Vegetação – Baixa densidade significativa (matas da Cantareira, extremo Sul, etc) , em todas as fontes de dados, com cobertura vegetal significativa (matas da Cantareira, extremo Sul, etc) e junto a categoria de Superfície Aquática, em contraste com as temperaturas mais elevadas observadas nas regiões mais áridas da cidade, classificadas como Área Urbana – Média e Alta Densidade (região central e antigas áreas industriais ao longo do Rio Tamanduateí - Mooca, Brás -, zona leste, etc).

Nota-se, também, a formação de algumas zonas frias provocadas pela projeção das sombras das edificações nas áreas com maior padrão de ocupação vertical (ex. região central, Av. Paulista, etc), predominantemente encontradas na porção classificada como Área Urbana – Baixa Densidade. Zonas frias essas também observadas nas áreas dos chamados bairros jardins - Jardim Europa, Cidade Jardim, Chácara Flora, Granja Julieta, etc -, devido a predominância de ocupação residencial horizontal e intensa arborização urbana. Além disso, é possível relacionar a influência dos materiais encontrados nas superfícies

registradas pelo sensor termal, isto é, a emissividade dos materiais, e as respectivas temperaturas aparentes reveladas.

Contudo, os resultados de TST não foram tão satisfatórios, principalmente em relação ao período da primavera-verão, com apenas 3,44% das estações meteorológicas dentro do espectro de diferença entre Tar e TST muito baixa a média; já o período de outono-inverno apresenta 51% das estações com uma diferença de muito baixa a média, e apenas 34% como diferença muito alta. Não só na espacialização da TST, mas também na interpolação espacial da Tar, os resultados de inverno foram melhores, visto que é mais propício a ter uma redução local e momentânea de temperatura, como sobre de árvores ou umidade de rios, do que um aumento espontâneo de temperatura.

O satélite Landsat-8 apresenta pixel de 30 metros em seu sensor OLI, com 15 metros na banda pancromática, o que provocou demasiada generalização, principalmente em área urbana com diferentes materiais adensados em poucos metros quadrados; e pixel de 100 metros em seu sensor TIRS, ou seja, a interpretação da temperatura de brilho e, por sua vez, de superfície, adicionou outra camada de generalização dos resultados. Desta forma, a utilização de diferentes satélites e insumos combinados podem vir a auxiliar a precisão dos resultados, como, por exemplo, utilizar um catálogo de imagens de levantamento aéreo com maior resolução espacial para a classificação de uso e cobertura do solo, e um segundo insumo de banda termal – o satélite CBERS 4, tecnologia sino-brasileira, apresenta banda termal de 80 metros, por exemplo.

Além disso, é importante ressaltar que a própria coleta de dados e instalação das estações meteorológicas do CGE estão propícias a erros, uma vez que não seguem os critérios estabelecidos pelo INMET, estando posicionadas, em sua maioria, abaixo de edificações ou árvores, sobre rios e córregos ou sobre edificações sem qualquer grama ou vegetação local abaixo. Este mosaico conturbado da região metropolitana de São Paulo, aonde as categorias de uso e ocupação de classe se sobrepõem, adicionados ao erro de pixel e ao posicionamento incorreto das estações, torna difícil a interpretação e a determinação exata da qualidade dos resultados.

No entanto, pois, utilizando o escopo teórico de Armani e Tarifa, publicado pelo Atlas Ambiental do Município de São Paulo, pode-se validar os resultados mais eficientemente. Pode-se afirmar que o modelo de correção atmosférica pela emissividade dos materiais e sensoriamento remoto pode ser uma alternativa interessante para prever temperaturas, especialmente em áreas com maior homogeneidade nas categorias de uso e ocupação do solo e em temperaturas mais amenas, enquanto o método de interpolação espacial pela Cokrigagem torna-se mais eficiente em áreas metropolitanas, uma vez estas tendo dados meteorológicos.

Por fim, é importante apontar que os dados de temperatura do ar no extremo leste fornecidos pelo CGE e interpolados pela Cokrigagem diferem da caracterização de Clima Urbano Periférico definido por Armani e Tarifa (2002), uma vez que menos no verão apresentava temperaturas mais amenas, o que pode indicar um erro de medição dos termômetros das estações meteorológicas do CGE ou que a região está em outro processo de urbanização e requer uma atualização referente a seu mesoclima.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo. Bol. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. USP, São Paulo, n.219, 1957. (Geografia, 12).

AGOPYAN, V.; JHON, V.M. Desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blucher, 2011

ALVES, R. Estações meteorológicas do CGE/SP – Localização/Fotos. Brasil Abaixo de Zero. Disponível em: <
<http://www.abaixodezero.com/index.php?/topic/6573-esta%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-do-cgesp-localiza%C3%A7%C3%A3ofotos/>>. Acesso em: Novembro de 2020.

Análise espacial (Interpolação) In: Documentação do QGIS2.8. Responsabilidade: QGIS Development Team. Disponível em: <
https://docs.qgis.org/2.8/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_in_interpolation.html>. Acesso em: abr. 2020.

AZEVEDO, A.C. et. al. Ilhas de calor e ilhas de frescor: uma abordagem direcionada para a sala de aula. *Revista Diálogos*, v.1, n.17, p.213-231, abril/maio, 2017.

BARSI, J.A., J.L. BARKER, J.R. SCHOTT. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 23. (IGARSS) 2003, Toulouse, France. *Anais...* Toulouse, France: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2003.

BARTOLIUCCI, L.A.; CHANG, M. Look-up Tables to Convert Landsat TM Thermal IR Data to Water Surface Temperatures. *Geocarto International* v.3, 1988. p. 61-67

BERNATZKY, A. "The effects of trees on the urban climate" In: *Trees in the 21st century*. Academic Publishers, Berkhamster, 1983, p. 59-76.

CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2000.

Contemp Indústria, Comércio e Serviços Ltda. Tabela de Emissividades. Disponível em: http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf. Acesso em: abr. de 2020.

DIAS, M.B.G.; NASCIMENTO, D.T.F. Clima urbano e ilhas de calor: aspectos teórico-metodológicos e estudo de caso. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 10, n. 12, 2014. p. 27-41.

FRANÇA, A. Estudo sobre o clima da bacia de São Paulo. Boletim nº LXX da FFCL da USPP, São Paulo, 1946.

GEO cidade de São Paulo: panorama do meio ambiente urbano / SVMA, IPT. -- São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente; Brasília: PNUMA, 2004.

GUSSO, A.; FONTANA, D.C.; GONÇALVES, G.A. Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com o uso do sensor AVHRR/NOAA. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.42, n.2, p.231-237, fev. 2007.

JENSEN, J.R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

RICHARDS, A.J. Remote sensing digital image analysis: an introduction. 5 ed. Heidelberg, Alemanha: Springer, 2013

LOMBARDO, M.A. Ilha de calor nas metrópoles. São Paulo: Hucitec, 1985.

MAIA, M.A. et. al. Modelos de correção atmosférica aplicados em imagens OLI/Landsat 8 a partir do uso de programas gratuitos: uma análise comparativa. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18. (SBSR), 2017, Santos. *Anais...* Santos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017. p. 4888-4895.

MARTINS, A.P.; ALVES, W.S.; DAMASCENO, C.E. Avaliação de métodos de interpolação para espacialização de dados de temperatura do ar na bacia do rio Paranaíba – Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.25, n.23, 2019, p. 444-463.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. de. (Org.). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: Universidade de Brasília (UnB), 2012.

MONTEIRO, C.A.F. Teoria e Clima Urbano. São Paulo: IG/USP, 1976.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Landsat Science: thermal infrared sensor (TIRS). Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/thermal-infrared-sensor-tirs/>>. Acesso em: abr. 2020.

_____. Landsat Science: spectral response of the thermal infrared sensor. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/preliminary-spectral-response-of-the-thermal-infrared-sensor/>>. Acesso em: abr. 2020.

_____. Atmospheric correction parameter calculator. Disponível em: <<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: abr. 2020.

_____. NASA earth observatory. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images>>. Acesso em: abr. 2020.

NOVO, E.M.L. de M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 2 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1995.

OLIVEIRA, H.T. Climatologia das temperaturas mínimas e probabilidade de ocorrência de geado no Estado do Rio Grande do Sul. 1997. 81p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O que é geotecnologia?. Responsabilidade: Santiago&Cintra Geotecnologias. Disponível em: <<https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geo-tecnologias/o-que-e-geotecnologia>>. Acesso em: 26 abr. 2020.

SCHNEIDER, A. Understanding urban growth in the context of global changes. IHDP UPDATE, 2006.

Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente/Prefeitura Municipal de São Paulo (SVMA/PMSP); Secretaria Municipal de Planejamento/Prefeitura Municipal de São Paulo (SEMPLA/PMSP). Atlas Ambiental do Município de São Paulo, 1ª aproximação. Fase 1, 2002.

_____. Mudanças climáticas: inventários de emissões e remoções antrópicas de gases do efeito estufa no município de São Paulo. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/comite_do_clima/index.php?p=284393>. Acesso em: Novembro de 2020>.

SOARES, F.S. et. al. Análise comparativa da correção atmosférica de imagem do Landsat 8: o uso do 6S e do ATCOR2. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2015. p. 1821-1828.

TARIFA, J. R.; AZEVEDO, T. R de. Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática. GEOUSP - Coleção novos caminhos. São Paulo: USP/Laboratório de Climatologia/DG/FFLCH, 2001.

TARIFA, J. R.; ARMANI, G. As unidades climáticas urbanas da cidade de São Paulo: os climas e a (re)produção do espaço nas metrópoles. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/>. Acesso em: Out. de 2020.

USGS. United States Geological Survey. Landsat 8 (L8) data users handbook. 5ª ed. Virgínia, Estados Unidos, 2019.

_____. Landsat Missions: using the USGS Landsat 8 product. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>>. Acesso em: Abr. de 2020.

_____. Landsat Missions: 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: abr. de 2020.

_____. Landsat Missions: spectral characteristics viewer. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>>. Acesso em: Abr. de 2020.

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

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.M. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/arquivos/secretarias/meio_ambiente/projetos_acoes/0004/capitulo2.pdf

ANEXO A – Cenas adquiridas do satélite Landsat-8



Figura 18 - Composição Pancromática da cena LC82190762019021LGN00 de 21/01/2019.
Fonte: United States Geological Survey, 2019.

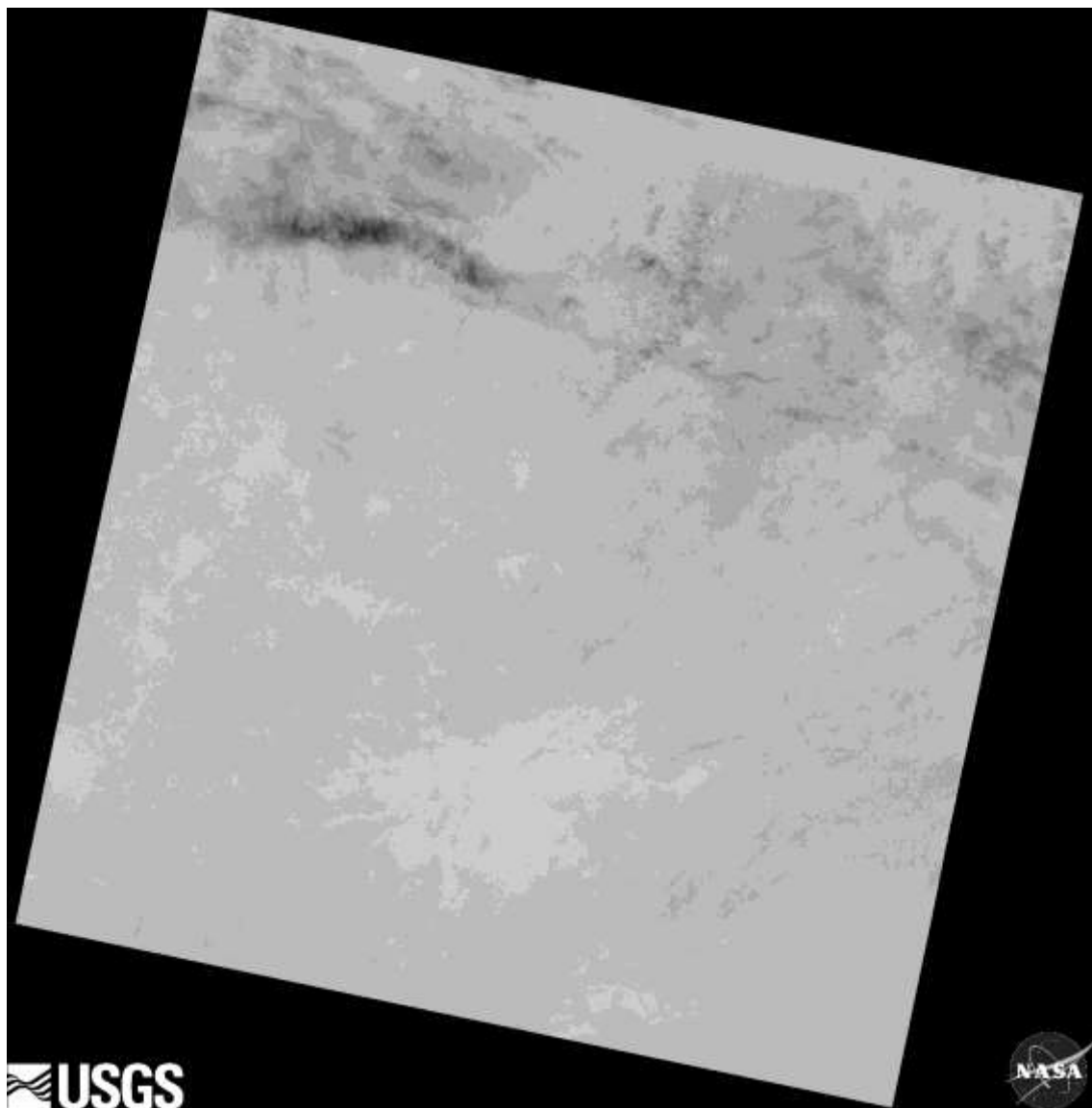


Figura 19 - Bandas termais da cena LC82190762019021LGN00 de 21/01/2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019.

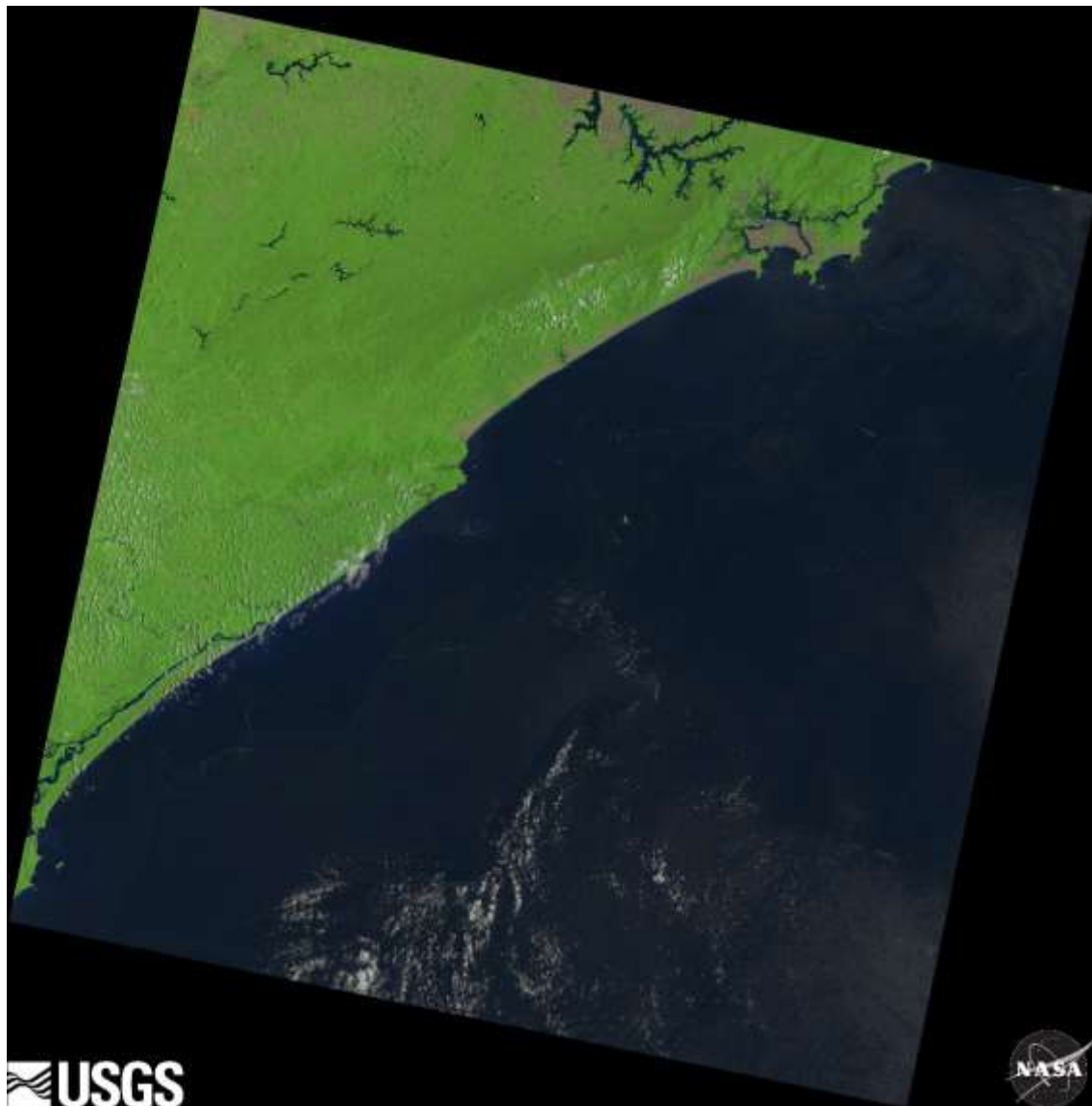


Figura 20 - Composição Pancromática da cena LC82190772019021LGN00 de 21/01/2019.
Fonte: United States Geological Survey, 2019.

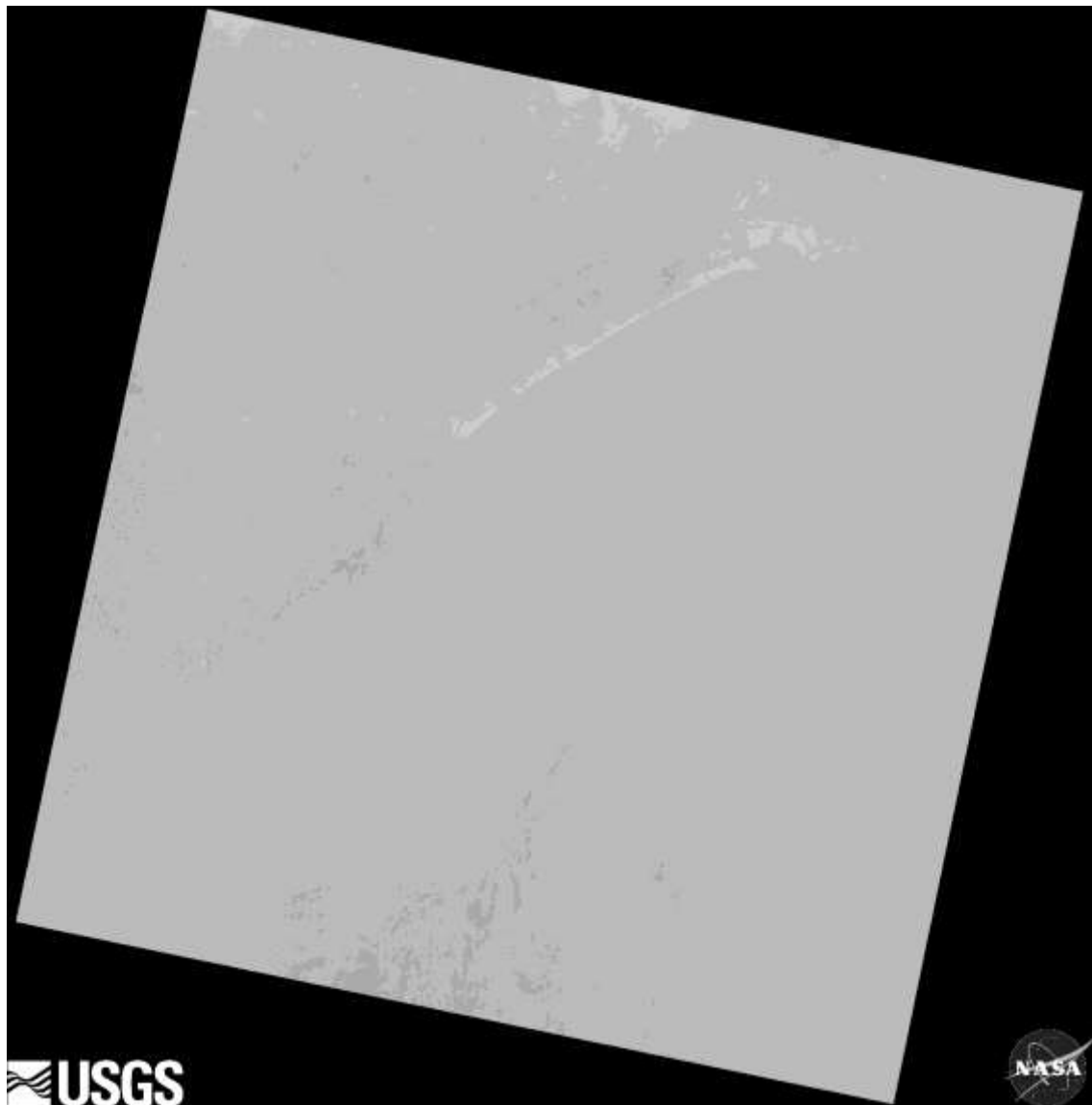


Figura 21 – Bandas termais da cena LC82190772019021LGN00 de 21/01/2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019.

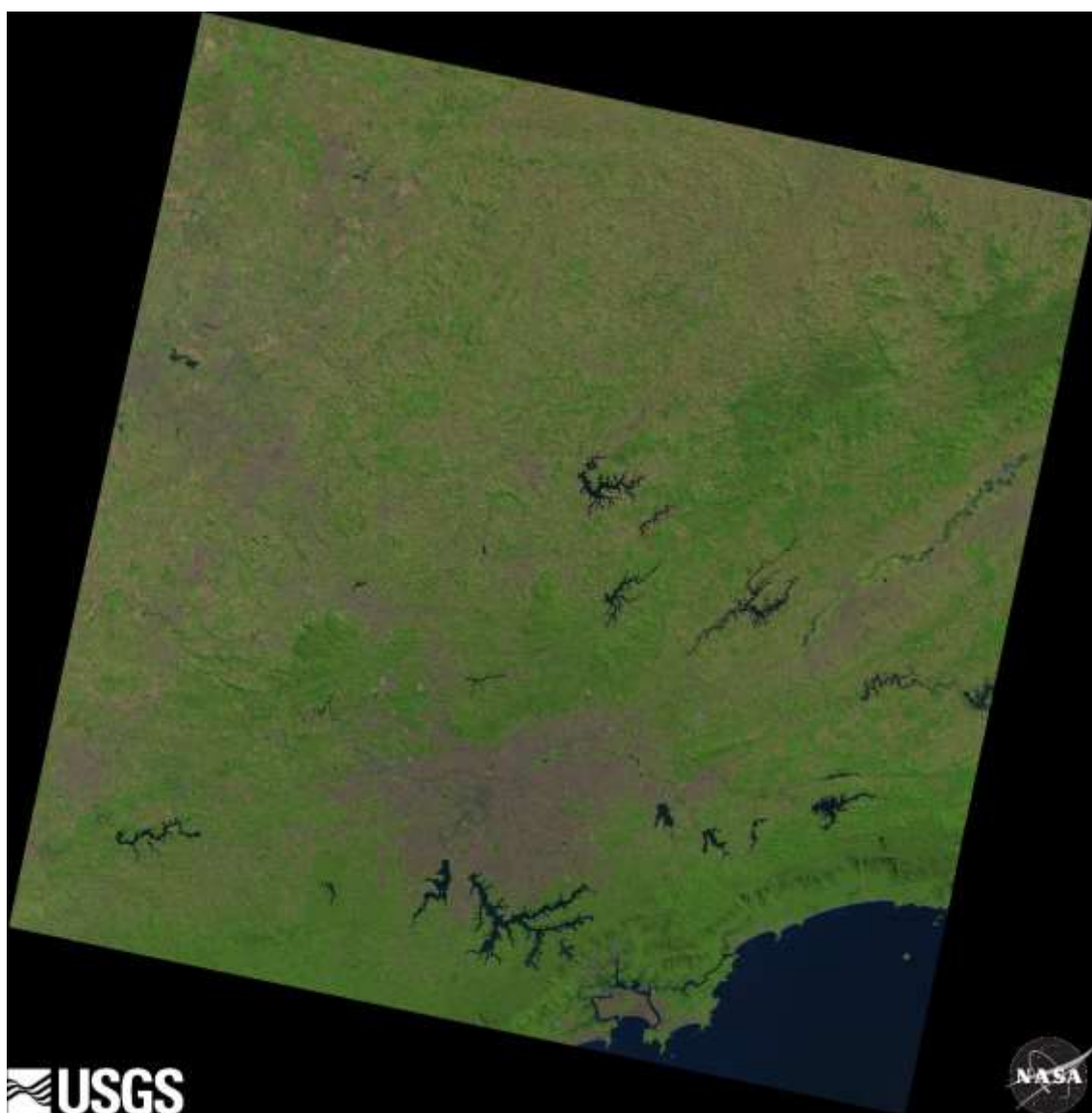


Figura 22 - Composição Pancromática da cena LC82190762019229LGN00 de 17/08/2019.
Fonte: United States Geological Survey, 2019.

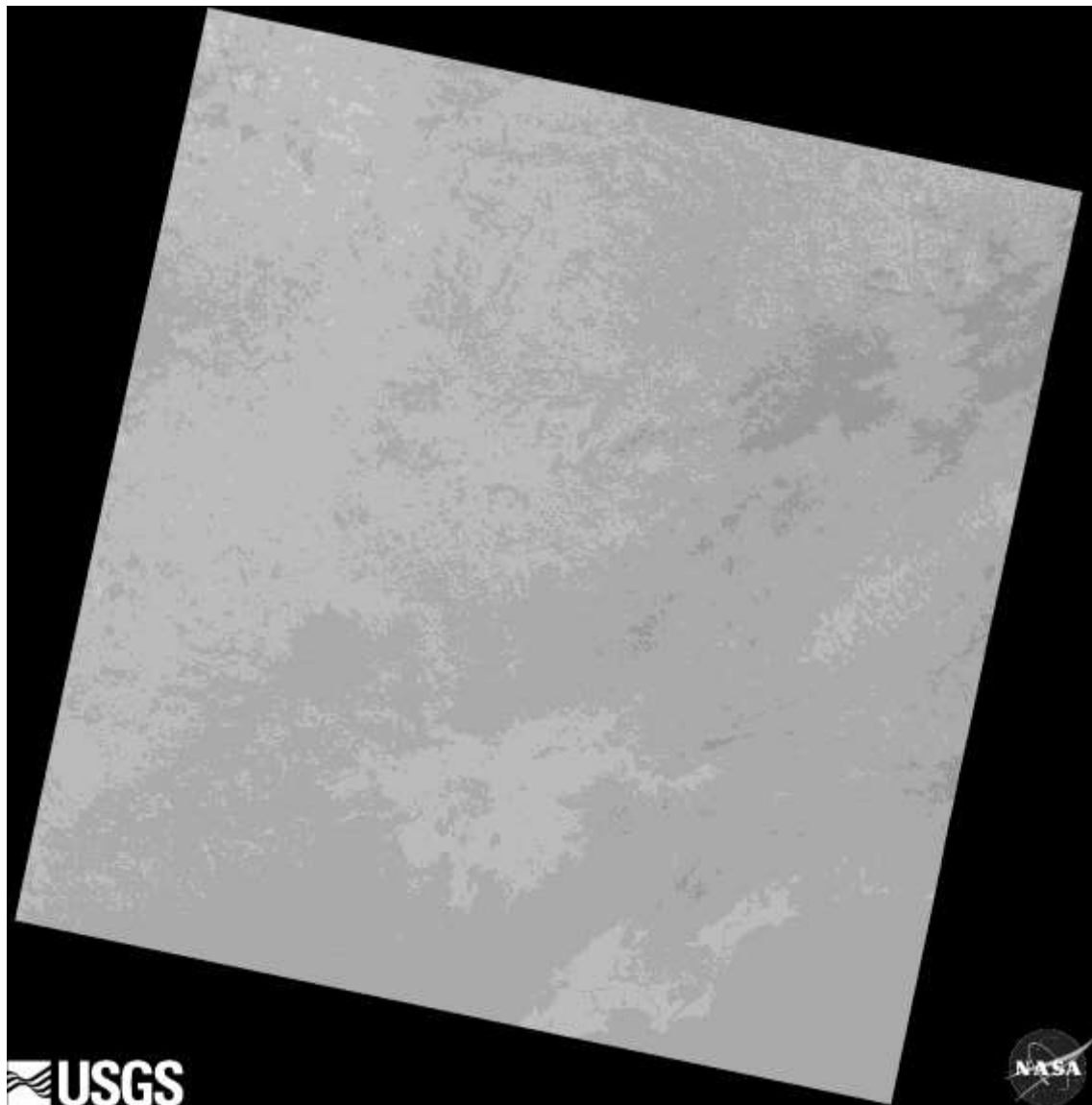


Figura 23 – Bandas termais da cena LC82190762019229LGN00 de 17/08/2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019.



Figura 24 - Composição Pancromática da cena LC82190772019229LGN00 de 17/08/2019.
Fonte: United States Geological Survey, 2019.

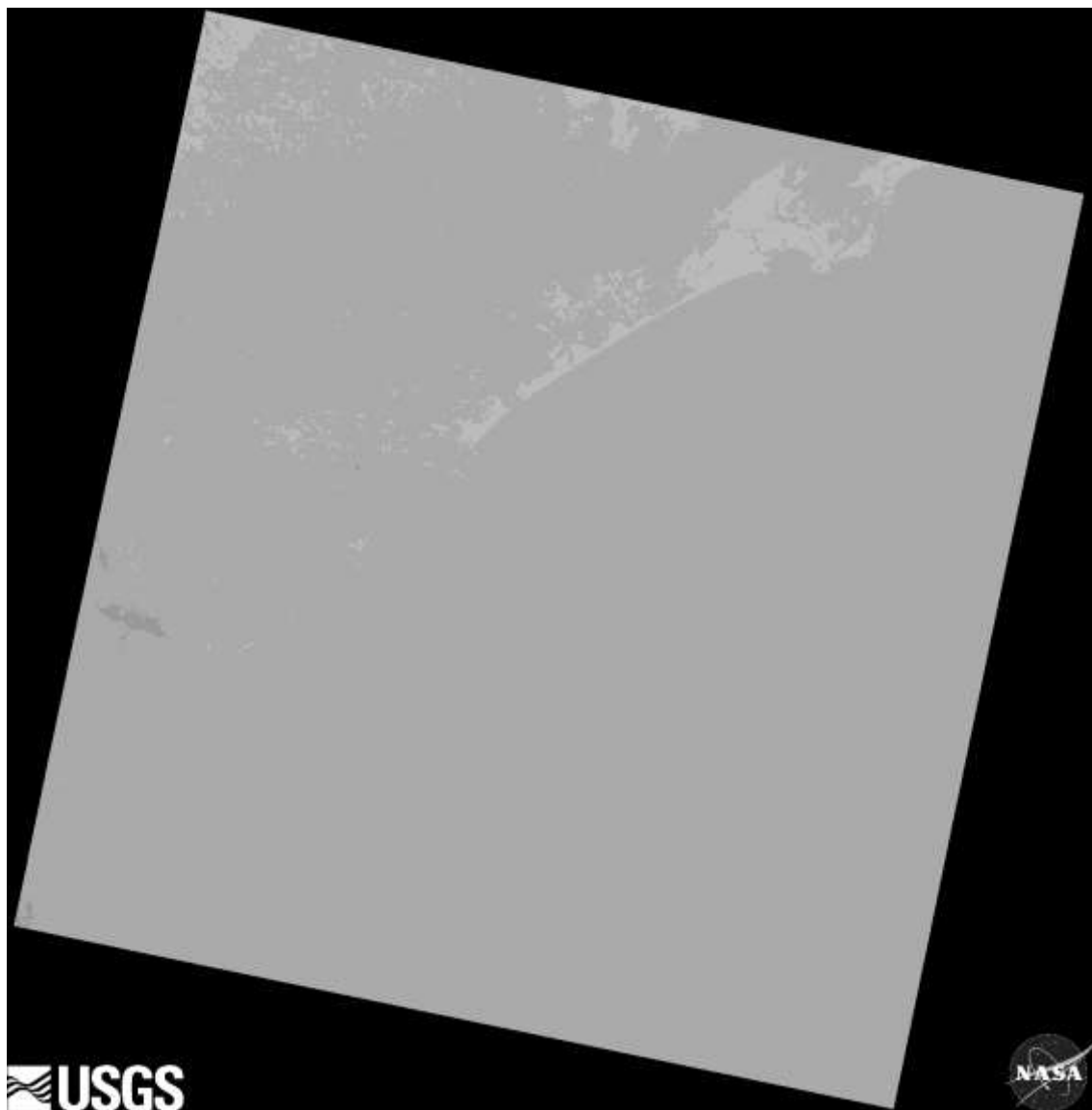


Figura 25 – Bandas termais da cena LC82190772019229LGN00 de 17/08/2019. Fonte: United States Geological Survey, 2019.

ANEXO B – Mapas de Temperatura da Superfície Terrestre de 1999 e 2000

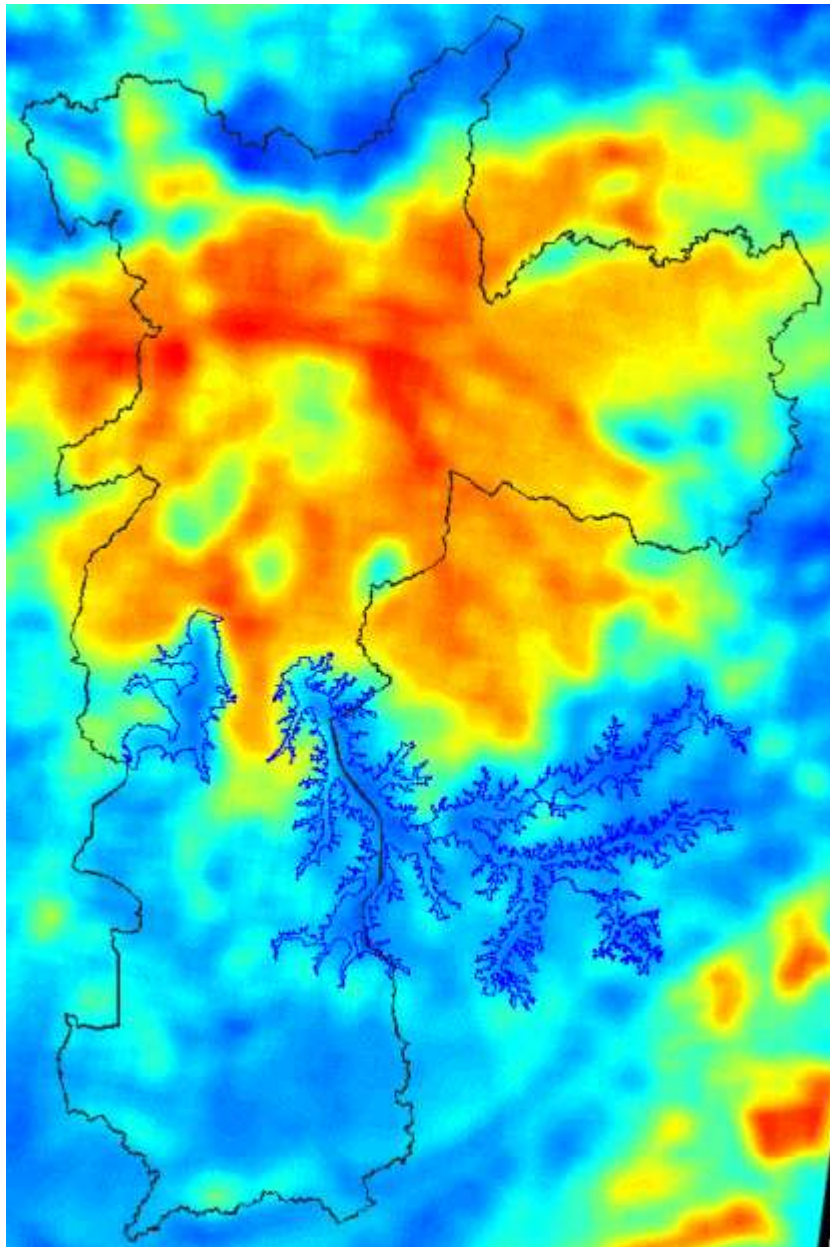


Figura 26 - Imagem processada da banda termal de alto ganho gerada pelo satélite Landsat-7 em 30/04/2000. Fonte: Atlas Ambiental do Município de São Paulo, 2000.

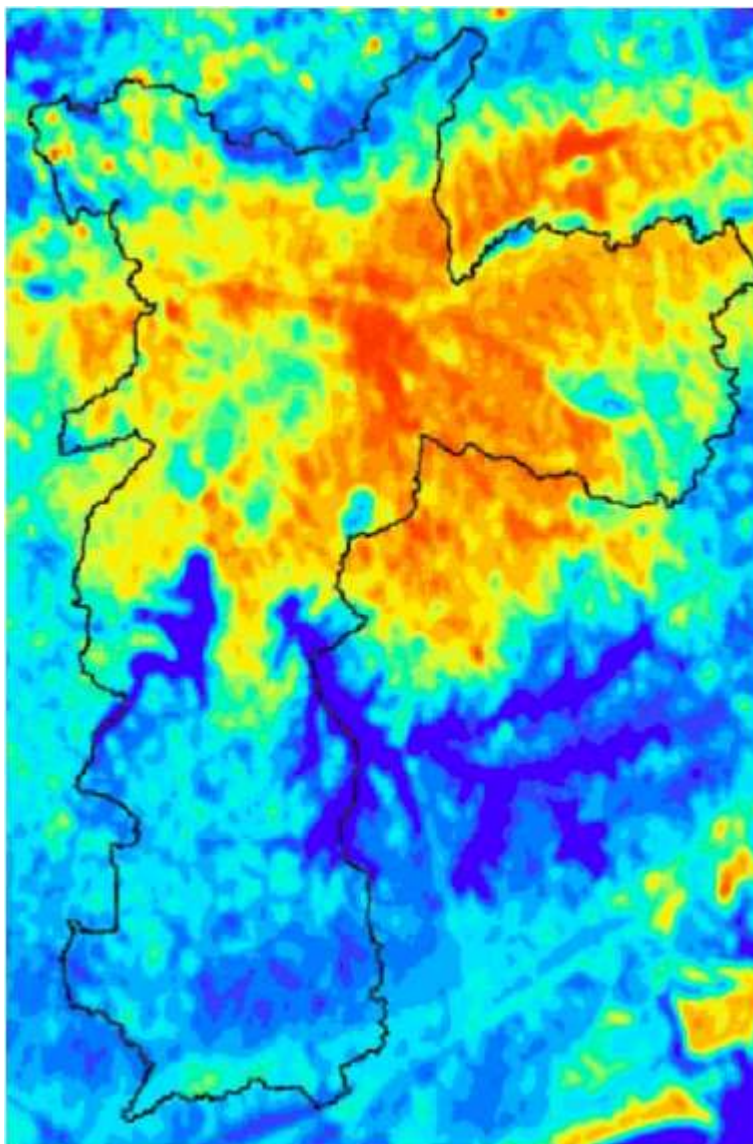


Figura 27 - Mapa da temperatura aparente de superfície em 03/09/1999. Fonte: Atlas Ambiental do Município de São Paulo, 2000.



Figura 28 - Escala cromática associada à temperatura aparente calculada de acordo com o modelo de MALARET et al. (1985). Fonte: SMVA/PMSP, 2002. Elaborado por: Armani e Tarifa, 1999-2001.

ANEXO C – Fotografias de Campo das Estações Meteorológicas do CGE



Figura 29 - Estação Anhembi/CGE, Marginal Tietê, próximo ao km 12, -23.518626 -46.643757. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mar. 2020.



Figura 30 - Estação Butantã/CGE, Av. Prof. Mello Moraes s/n - Cidade Universitária (Dentro da CTH-USP), -23.5545389 -46.7259528. Foto por: Rodolfo Alves, 2017.



Figura 31 - Estação Campo Limpo/CGE, Avenidas Carlos Caldeira Filho x Rua Túlio Mugnaini, - 23.65818 -46.76749. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jun. 2019.



Figura 32 - Estação Capela do Socorro/CGE, Av. Sadamu Inoue, 907 - Jardim Marcelo (Dentro da Estação Elevatória da SABESP), -23.781133 -46.725217. Foto por: Rodolfo Alves, 2017.

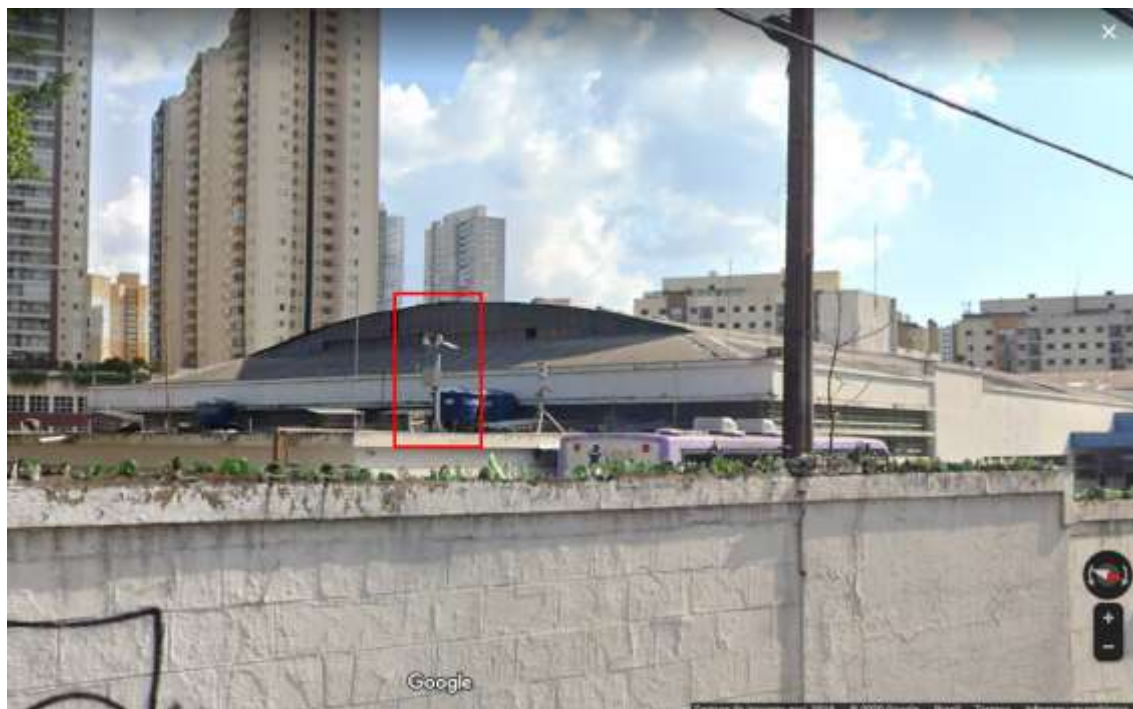


Figura 33 - Estação Cidade Ademar/CGE, Av. Yervant Kissajikain, 416 - Vila Constância (Prefeitura Regional de Cidade Ademar), -23.6675 -46.675. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mai. 2019



Figura 34 - Estação Freguesia do Ó/CGE, Av. João Marcelino Branco, 95 - Vila dos Andrades, -23.47706 -46.66537. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mai. 2018.



Figura 35 - Estação Ipiranga/CGE, Avenida Marginal s/n, próximo a Av. Papa João Paulo XXIII - Vila Arapuã, -23.632978 -46.583518. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, set. 2011.

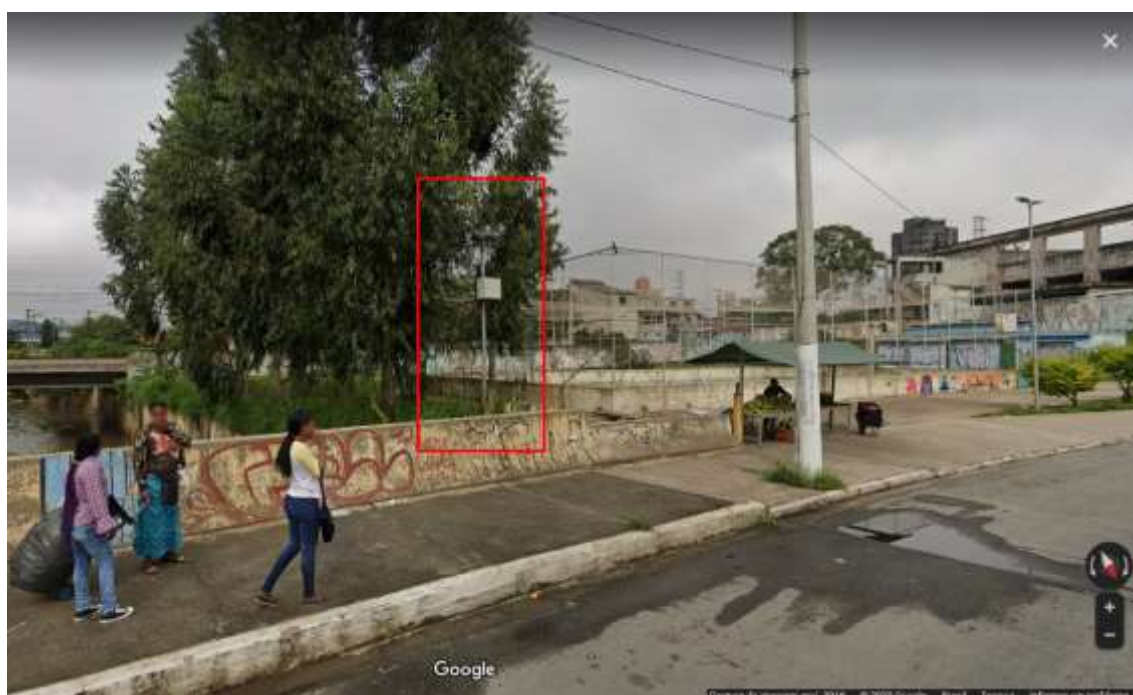


Figura 36 - Estação Itaim Paulista/CGE, Rua Santa Davina - Parque Paulistano, -23.49067 - 46.43599. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mai. 2019.



Figura 37 - Estação Itaquera/CGE, Avenida Jacú Pessego X Av. Professor João Batista Conti – Itaquera, -23.552301 -46.446110. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jun. 2019.



Figura 38 - Estação Jabaquara/CGE, Praça Serafina Gioncoli Vicenti - Jardim Oriental, -23.650814 -46.646581. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mar. 2019



Figura 39 - Estação Lapa/CGE, Cruzamento entre as Marginais Tietê/Pinheiros (Cebolão) - Vila Leopoldina, -23.52556 -46.75083. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jul. 2019



Figura 40 - Estação Marsilac, Estrada da Ponte Seca - Posto SABESP, -23.916332 -46.727397. Fonte: Google Maps Imagery, 2020.



Figura 41 - Estação M'Boi Mirim/CGE, ao lado da barragem Represa de Guarapiranga, - 23.6714856871 -46.7273046498. Foto tirada por: Rodolfo Alves, 2017.



Figura 42 - Estação Mooca/CGE, Av. Marginal Tietê, próximo ao km 18 (Pte. Dutra) - Belenzinho, -23.530444 -46.595059. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, set. 2019.



Figura 43 - Estação Parelheiros-Barragem/CGE, Estrada João Lang, 153 – Barragem (Aldeia Guarani Tenodé-Porã), -23.8677777778 -46.6522222222. Foto por: Rodolfo Alves, 2017.



Figura 44 - Estação Penha/CGE, Rua Atuaí, 1009 x Praça Walter de Azevedo - Vila Esperança (Atrás da Estação Vila Matilde do Metrô), -23.530763 -46.528744. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jul. 2018.



Figura 45 - Estação Perus/CGE, Rua Ylídio Figueiredo, 349 - Vila Perus (Dentro da Prefeitura Regional de Perus), -23.40716 -46.75264. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mai. 2019.



Figura 46 – Estação Pinheiros/CGE, Parque Linear das Corujas - Vila Madalena, -23.551871 -46.695939. Foto por: Rodolfo Alves, 2017.



Figura 47 - Estação Pirituba/CGE, Rua Carlos da Cunha Mattos, 67 - Chácara Inglesa, -23.489 - 46.727. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jan. 2016.



Figura 48 - Estação Santo Amaro/CGE. Avenida Jornalista Roberto Marinho, -23.634789 - 46.667657. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jul. 2016.



Figura 49 - Estação São Mateus/CGE, Av. Aricanduva, 12550 (próximo a Av. Ragueb Choffi) - Jardim Cinco de Julho, -23.594199 -46.465567. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mar. 2020.



Figura 50 - Estação São Miguel Paulista/CGE, Rua Papiro do Egito, 2 - Jardim Nair, -23.491511 -46.45361. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mai. 2019.



Figura 51 - Estação Santana/CGE, Av. Zaki Narchi, 600 - Carandiru (Prédio do IPREM), -23.51064 -46.61746. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mai. 2019.



Figura 52 - Estação Sé/CGE, Rua Bela Cintra, 385 (Prédio da CET), -23.553 -46.656. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, abr. 2018.



Figura 53 - Estação Tremembé/CGE, Av Paulo Lincoln do Valle Pontin. x Rua Angelo Aloisio - Jaçanã, -23.459841 -46.585572. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, abr. 2019.

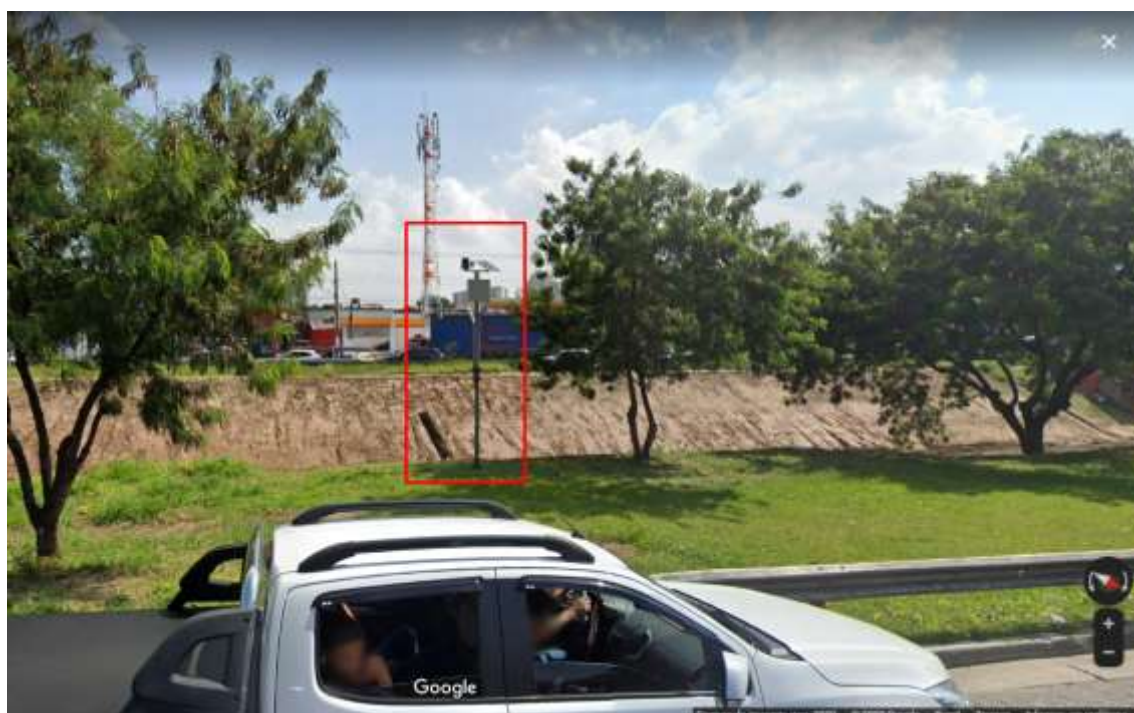


Figura 54 - Estação Vila Formosa/CGE, Av: Aricanduva, 5000 (próximo ao Shopping) - Jardim Aricanduva, -23.5640297766 -46.5082342067. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, mar. 2020.



Figura 55 - Estação Vila Mariana/CGE, Rua Conceição Veloso, 35 - Vila Mariana (Posto Sabesp - Polo MC), -23.58472 -46.63556. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, abr. 2019.



Figura 56 - Estação Vila Maria/Vila Guilherme/CGE, R. General Mendes, 111 - Vila Maria Alta, -23.501611 -46.591534. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jul. 2019.



Figura 57 - Estação Vila Prudente/CGE, R. Gen. Irulegui Cunha, 1 - Jardim Independência (Dentro da Prefeitura Regional da Vila Prudente), -23.583219 -46.560179. Fonte: Google Maps Imagery, Google Maps Street View, jul. 2019.