

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA
DO MEIO AMBIENTE – PPGEMA**

RUBENS VILLAR SIQUEIRA

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE NA REGIÃO
METROPOLITANA DE GOIÂNIA POR MEIO DE IMAGENS LANDSAT E
PREVISÃO DE TEMPERATURAS PARA PERÍODOS POSTERIORES**

GOIÂNIA – GO

2015

Página em Branco Reservada para Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA
DO MEIO AMBIENTE – PPGEMA**

RUBENS VILLAR SIQUEIRA

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE NA REGIÃO
METROPOLITANA DE GOIÂNIA POR MEIO DE IMAGENS LANDSAT E
PREVISÃO DE TEMPERATURAS PARA PERIODOS POSTERIORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira

GOIÂNIA – GO

2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
GPT/BC/UFG**

O428a Siqueira, Rubens Villar.
Estimativa da Temperatura de Superfície na Região Metropolitana de Goiânia por meio de imagens Landsat e Previsão de Temperaturas para Períodos Posteriores [manuscrito] / Rubens Villar Siqueira. – 2015
1110 f.: il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2015.

Bibliografia.

Inclui lista de Figuras, abreviaturas, siglas e Tabelas.
Apêndice.

1. Temperatura, Superfície – Região Metropolitana. 2. Sensoriamento Remoto – Geoprocessamento. 3. Imagens Landsat. I. Título.

CDU: 556.18(817.3)

RUBENS VILLAR SIQUEIRA

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE NA REGIÃO
METROPOLITANA DE GOIÂNIA POR MEIO DE IMAGENS LANDSAT E
PREVISÃO DE TEMPERATURAS PARA PERÍODOS POSTERIORES**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em **três** de **Dezembro** de **2015** pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira

Presidente da Banca

Prof. PhD. Alexandre Keppler Soares

Examinador Interno

Prof. Dr. Giovanni de Araújo Boggione

Examinador Externo

DEDICATÓRIA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à
minha família, aos amigos,
professores e todas as
pessoas que contribuíram
com essa jornada de
crescimento profissional.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho resulta do apoio e da colaboração de várias pessoas, amigos, companheiros e instituições. Cabem aqui o meu respeito a todos e um profundo agradecimento:

Aos familiares, agradeço pelo o apoio e incentivo fazendo com que eu prosseguisse no caminho do conhecimento, buscando sempre o aperfeiçoamento pessoal e profissional;

Ao professor doutor Nilson Clementino Ferreira pela orientação, confiança depositada em mim como pessoa e como aluno, pela oportunidade de crescimento profissional ao longo de nosso convívio no desenvolvimento deste trabalho;

Um agradecimento aos professores do mestrado pela transferência de seu conhecimento, em especial os professores doutores Alexandre Kepler Soares, Kleber Formiga e José Vicente, pois ao transferirem o conhecimento que possuem souberam exercê-lo com uma didática impecável.

À Universidade Federal de Goiás (UFG) e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA).

Um agradecimento aos colegas de mestrado que de alguma maneira ou outra me auxiliaram nessa jornada.

Agradeço também ao CNPQ juntamente com o Ministério da Educação (MEC) pelo fornecimento da bolsa de pesquisa;

Aos membros que compõe a banca examinadora e de maneira geral a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

RESUMO

A análise do clima, seja em escala global, regional ou local, tem sido objeto de pesquisa em diversas áreas das ciências da terra. Dentre os parâmetros climáticos, a temperatura e a precipitação ganharam importância nas últimas décadas devido as alterações significativas em suas magnitudes. Desta forma, este trabalho executa uma análise particularizada da temperatura para a Região Metropolitana de Goiânia, utilizando imagens de satélites a fim de gerar a temperatura de superfície para a área de estudo, em um primeiro momento, por meio de uma análise entre os anos de 1997 e 2008 e após em cerca de vinte anos, periodicamente a cada quatro anos, para os anos de 1997, 2001, 2005, 2009 e 2014. Os mapas elaborados, além de mostrarem a variação espacial das ilhas de calor urbano, demonstram que houve variações significativas para as temperaturas mínimas, máximas e médias. Entre o período de 1997 e 2008, as mínimas decrescem aproximadamente em $1,4^{\circ}\text{C}$ e as máximas saltam de $31,2^{\circ}\text{C}$ para $36,0^{\circ}\text{C}$. Os resultados da análise para os cinco períodos entre 1997 e 2014, demonstram que o ano de 2014 se apresentou como o mais quente entre os anos estudados. Por meio dos mapas resultantes desta análise, é possível notar que a amplitude das temperaturas, diferença entre as máximas e mínimas, crescem com o decorrer dos anos. Um modelo de validação das temperaturas estimadas por satélite foi executado por meio da comparação direta entre a temperatura de superfície e os dados da estação meteorológica GOIÂNIA, pertencente ao INMET, apresentando diferenças de $0,7^{\circ}\text{C}$ a $1,9^{\circ}\text{C}$ entre as temperaturas, demonstrando a aplicabilidade de imagens de satélite para estimativa de temperaturas em áreas que não dispõem de uma rede meteorológica adensada. A última análise executada trata da previsão de temperaturas mensais para o período entre os anos de 2040 a 2047, utilizando o método de Holt-Winters. O modelo adotado para a previsão permitiu a computação da sazonalidade das temperaturas mensais mínimas, médias e máximas para o período histórico entre os anos de 1970 a 2015. As temperaturas previstas reafirmam a expectativa do aumento das temperaturas mínimas, médias e máximas apresentadas pela análise dos dados históricos. Conforme demonstrado, além dos aumentos nas temperaturas mensais, a ocorrência destas se situará em regiões mais altas, com cerca de $1,0^{\circ}\text{C}$ mais quentes. Podemos notar que, também, após o ano 2000, todas as temperaturas se elevam de forma significativa, onde suas amplitudes entre as mínimas e máximas se situam em um patamar mais elevado que nos anos anteriores.

Palavras-chave: Temperatura de superfície, ilha de calor urbano (ICU), imagens de satélites, previsão de temperaturas.

ABSTRACT

Climate analysis, whether at global, regional or local level, it has been the subject of research in various fields of earth sciences. Among the climatic parameters, temperature and precipitation have gained importance in recent decades because of significant changes in their magnitudes. Thus, this work performs a detailed analysis of the temperature for the Greater Goiânia, using satellite images to generate surface temperature for the study area, at first, through an analysis between the years 1997 and 2008 and after in about twenty years, periodically every four years, for the years 1997, 2001, 2005, 2009 and 2014. The elaborate maps, besides showing the spatial variation of urban heat islands, show that there was significant changes to the minimum temperature, maximum and average. Between the period 1997 and 2008, the minimum decrease about 1.4°C and maximum jump of 31.2°C to 36.0°C. Test results for the five periods between 1997 and 2014, show that the year 2014 is presented as the hottest in the years studied. Through the resulting maps of this analysis, it can see that the range of temperatures, the difference between the maximum and minimum, grow with the years. An estimated temperature of satellite validation model was performed by direct comparison between the surface temperature and the data of GOIÂNIA weather station belonging to INMET, with differences of 0.7°C to 1.9°C between the temperatures demonstrating the applicability of satellite images to estimate temperatures in areas that do not have a dense meteorological network. The last analysis performed is forecast monthly temperatures for the period between the years 2040-2047, using the method of Holt-Winters. The model used for predicting allowed the computation of the seasonality of the minimum monthly temperatures, average and maximum for the historical period between the years 1970 to 2015. The predicted temperatures renew the expectation of increased minimum temperatures, average and maximum presented by the analysis of Historic data. As shown, in addition to the monthly increases in temperature, the occurrence of these will be situated in the highest classes of about 1.0° C warmer. We can see that, too, after 2000, all temperatures rise significantly, where their amplitudes between the minimum and maximum are located at a higher level than in previous years.

Keywords: surface temperature, urban heat island (UHI), satellite images, temperature forecast.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUÇÃO GERAL	18
OBJETIVO GERAL	21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
CAPITULO 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
1.1 – CONCEITOS SOBRE O SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL.....	22
1.2 - O SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL EM ÁREAS URBANAS	29
1.3 – ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO REMOTO.....	34
CAPÍTULO 2. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E EXPANSÃO URBANA NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA – GO.....	41
2.2 – MATERIAL E MÉTODOS	44
2.3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
2.4 - CONCLUSÕES	52
CAPITULO 3. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E SUAS RELAÇÕES COM O MEIO FÍSICO.	54
3.1 – INTRODUÇÃO	54
3.2 - MATERIAL E MÉTODOS	55
3.2.1 – PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS	55
3.2.2 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	57

3.2.3 – COBERTURA E USO DO SOLO	59
3.2.4 – TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	64
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
3.3.1 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	66
3.3.2 COBERTURA E USO DO SOLO	69
3.3.4 – TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	78
3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
CAPITULO 4. MODELO PARA PREVISÃO DE TEMPERATURAS.....	86
4.1 – INTRODUÇÃO	86
4.2 – MATERIAL E MÉTODOS	88
4.2.1 – MODELOS DE PREVISÃO CLIMÁTICA	88
4.2.1.1 – MODELO DE SUAVIZAÇÃO EXPONENCIAL DE HOLT-WINTERS	89
4.2.2 – APLICAÇÃO DO MÉTODO AOS DADOS DE TEMPERATURA	91
5.0 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Albedos em áreas urbanas e sua refletividade. Fonte: Adaptado de Bias et al. (2003).	24
Figura 2 - Esquema de um escâner termal. Fonte: Adaptado de Lillesand, Kiefer & Chipman (2004) 25	25
Figura 3- Perfil teórico de ilha de calor urbano (ICU). Fonte: Adaptado de Bias et al. (2003).	30
Figura 4 - Aumento do tamanho das cidades e do número de habitantes pode causar aumento da temperatura urbana. Fonte: Adaptado de Bhatta (2010).....	31
Figura 5 - Ilustração do efeito atmosférico sobre a radiação termal. Fonte: Adaptado de Li et al. 2013.	35
Figura 6 - Localização da Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.....	42
Figura 7 - Histogramas das bandas 5, 4 e 3. Fonte: O autor.....	46
Figura 8 - Temperatura de Superfície para os anos de 1997 e 2008.	48
Figura 9 - Mapa de uso do solo para os anos de 1997 e 2008.	49
Figura 10 - Demonstrativo das temperaturas médias de superfície e uso do solo para o ano de 1997..	50
Figura 11 - Demonstrativo das temperaturas médias de superfície e uso do solo para o ano de 2008..	52
Figura 12 - Interação vegetação - NDVI.	58
Figura 13 - Fluxograma do trabalho de classificação das imagens do estudo.....	60
Figura 14- Amostras das classes utilizadas para a classificação. Fonte: O autor.	62
Figura 15 - Assinaturas espectrais das amostras utilizadas na classificação. Fonte: O autor.....	63
Figura 16 - NDVI para a Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.	67
Figura 17 - SAVI para a Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.....	68
Figura 18 - IAF para Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.	69
Figura 19 - Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O Autor.....	70
Figura 20 - Gráfico dos valores de áreas médias de Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.....	71
Figura 21 - Gráfico dos valores dos totais de áreas de Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia.	72
Figura 22 - Temperatura de Superfície para a Região Metropolitana de Goiânia (1997 - 2014).....	78
Figura 23 - Comparativo de temperaturas (Estação x Satélite)	80
Figura 24 - Representação gráfica das temperaturas médias para o período de 1997 a 2014.	81
Figura 25 - Comparação dos índices de vegetação (IV's) x temperatura de superfície.	82
Figura 26 - Transecto de referência entre os pontos A e B. Fonte: O autor.	83
Figura 27 - Comparativo entre os perfis de temperatura e IV's.....	Erro! Indicador não definido.84
Figura 28- Histograma das temperaturas mínimas	Erro! Indicador não definido.92
Figura 29 - Histograma das temperaturas médias	93
Figura 30 - Histograma das temperaturas máximas	94
Figura 31 - Gráfico das temperaturas mínimas de acordo com o tempo. Fonte: O autor.....	95
Figura 32 - Gráfico das temperaturas médias de acordo com o tempo. Fonte: O autor	96
Figura 33 - Gráfico das temperaturas médias de acordo com o tempo. Fone: O autor.	97
Figura 34 - Gráfico das temperaturas mínimas mensais pelo método de Holt-Winters. Fonte: O autor.	100

Figura 35 - Gráfico das temperaturas médias mensais pelo método de Holt-Winters. Fonte: O autor.	100
Figura 36 - Gráfico das temperaturas máximas mensais pelo método de Holt-Winters. Fonte: O autor	101
Figura 37 - Aplicação dos parâmetros do Solver do Excel. Fonte: O autor.	102
Figura 38- Gráfico das temperaturas mínimas mensais – otimização pelo Solver-Excel. Fonte: O autor.....	103
Figura 39 - Gráfico das temperaturas médias mensais – otimização pelo Solver-Excel. Fonte: O autor	104
Figura 40 - Gráfico das temperaturas máximas mensais – otimização pelo Solver-Excel. Fonte: O autor.....	104
Figura 41 - Gráfico da previsão das temperaturas mínimas mensais. Fonte: O autor.	106
Figura 42 - Gráfico da previsão das temperaturas médias mensais. Fonte: O autor	108
Figura 43 - Gráfico da previsão das temperaturas máximas mensais. Fonte: O autor	109
Figura 44 - Histograma das temperaturas mínimas mensais previstas.Fonte: O autor.....	110
Figura 45 - Histograma das temperaturas médias mensais previstas. Fonte: O autor	112
Figura 46 - Histograma das temperaturas máximas mensais previstas. Fonte: O autor	113

LISTA DE QUADROS OU TABELAS

Tabela 1 - Emissividades (ϵ) médias de alguns materiais da superfície terrestre entre 8 a 14 μ m. Fonte: Lillesand, Kiefer & Chipman (2004)	23
Tabela 2 - Características dos Detectores de Fótons de Uso Comum. Fonte: Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).....	26
Tabela 3 - Temperatura cinética versus temperatura radiante para quatro tipos de materiais comuns. Fonte: Adaptado de Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).	28
Tabela 4 - Efeitos climáticos urbanos para uma cidade de latitude média, com cerca de 1.000.000 (um milhão) de habitantes. (Valores para o verão, a menos que indicado de outra forma). Fonte: Adaptado de Oke (1997), pág. 275.	32
Tabela 5 - Valores de ganho e bias para as cenas Thematic Mapper utilizadas no estudo.	44
Tabela 6 - Análise estatística entre uso do solo e temperatura em 1997.	50
Tabela 7 - Análise estatística entre uso do solo e temperatura em 2008.	51
Tabela 8 - Características técnicas das imagens Landsat.	55
Tabela 9 - Classes definidas da área de estudo.....	61
Tabela 10 - Características dos sensores termais. Fonte: O autor.	64
Tabela 11 - Constantes termais para as imagens Landsat.	64
Tabela 12 - Valores de λ para as bandas termais dos satélites Landsat. Fonte: Chander, Markhan & Helder (2009).	66
Tabela 13 - Valores de emissividade média para a área de estudo. Fonte: O autor. Adaptado de Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).	66
Tabela 14 - Áreas médias de Cobertura e Uso do solo para a Região Metropolitana de Goiânia. Valores em hectares. Fonte: O autor.	70
Tabela 15 - Áreas totais de Cobertura e Uso do Solo para a Região.....	71
Tabela 16 - Matriz de Classificação da imagem de 1997 para Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.....	72
Tabela 17-Matriz de Classificação da imagem de 2005 para Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.....	74
Tabela 18 - Matriz de Classificação da imagem de 2014 para Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O autor.....	75
Tabela 19 - Valores de coeficiente Kappa para o período de estudo. Fonte: O Autor.	76
Tabela 20 - Coeficientes Kappa e desempenhos de classificação. Fonte: Adaptado de Landis & Koch (1977).	77
Tabela 21 - Distribuição das áreas dos municípios na Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: O Autor.....	77
Tabela 22 - Validação dos valores de temperatura. Fonte: O autor.	79
Tabela 23 - Temperaturas médias (1997 - 2014). Fonte: O autor.	81
Tabela 24- Estatísticas descritivas para as temperaturas mínimas, médias e máximas. Estação Goiânia/INMET. Fonte: O autor	91
Tabela 25 - Classes e frequências das temperaturas mínimas. Fonte: O autor.....	92
Tabela 26- Classes e frequências das temperaturas médias. Fonte: O autor	93

Tabela 27 - Classes e frequências das temperaturas máximas. Fonte: O autor.	94
Tabela 28 - Resultado do Solver – Excel. Fonte: O autor	102
Tabela 29 - Temperaturas mínimas mensais previstas para os anos de 2040 a 2047. Fonte: O autor.	105
Tabela 30 - Temperaturas médias mensais previstas para os anos de 2040 a 2047. Fonte: O autor ...	107
Tabela 31 - Temperaturas máximas mensais previstas para os anos de 2040 a 2047. Fonte: O autor.	108
Tabela 32 - Classe e frequências das Temperaturas mínimas mensais previstas. Fonte: O autor	110
Tabela 33 - Classes e frequências das Temperaturas médias mensais previstas. Fonte: O autor	111
Tabela 34 - Classes e frequências das Temperaturas máximas mensais previstas. Fonte: O autor	112

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AATSR	Advanced Along-Track Scanning Radiometer
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CPT	Climate Predictability Tool
DN	Digital Number
DOS	Dark Object Subtraction
DOS1	Dark Object Subtraction 1
ESUN	Irradiância Solar Exo-Atmosférica
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IKONOS	Satélite de Observação Terrestre
IRI	International Research Institute for Climate Prediction
IV	Índices de Vegetação
IVP	Imagem de Satélite no canal do comprimento de onda do Infravermelho Próximo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MOD11A1	Imagem MODIS que combina temperatura de superfície e emissividade diária global
MTR	Modelo de Transferência Radiativa
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric
OLI	Operacional Terra Imager

QUICKBIRD	Satélite de Alta Resolução Espacial
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SAM	Spectral Angle Mapper
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager
SIEG	Sistema Estadual de Geoinformação
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
ToA	Reflectância no Topo da Atmosfera
Trad	Temperatura Radiante
Tskin	Temperatura Cinética
V	Imagem de Satélite no canal do comprimento de onda do Vermelho

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento das cidades tem impulsionado o desenvolvimento socioeconômico, mas em contrapartida acarreta vários problemas. Recentemente, o desenvolvimento sustentável das cidades se tornou tema dominante entre os planejadores do espaço urbano. De fato, a análise e a avaliação dos impactos ambientais do crescimento urbano e a magnitude dos problemas ocasionados por essa expansão são necessidades frequentes, mas, por outro lado, a complexidade para analisar os fortes desequilíbrios entre as cidades e seus arredores, monitorar os processos de ocupação e expansão, bem como aplicar práticas de planejamento e gestão urbana tem sido fortemente sentida nos últimos anos (BHATTA, 2010).

A análise espacial de áreas urbanas é importante, pois o crescimento das cidades pode trazer impactos positivos e negativos. Como aspectos positivos do crescimento urbano, tem-se: desenvolvimento da economia, incremento de empregos, aumento na quantidade e qualidade de serviços e bem estar da população. Por outro lado, os impactos negativos são imediatamente sentidos pela população, que sofre com prejuízos materiais, ambientais, financeiros e culturais, chegando, em casos extremos, a provocar crises nas várias esferas institucionais. Em muitos países, inclusive nos países desenvolvidos, o crescimento urbano mal planejado está ameaçando o meio ambiente, a saúde e a qualidade de vida (FRUMKIM, 2002).

Um fenômeno recorrente da expansão urbana é a ilha de calor urbano, uma realidade permanente em ambientes densamente urbanizados. Portanto, insere-se neste contexto a Região Metropolitana de Goiânia, que de acordo com o levantamento censitário elaborado em 2010, apresentou crescimento populacional acima da média do Estado de Goiás e do Brasil (IBGE, 2010). A taxa de crescimento populacional, entre os anos de 2000 e 2010, foi de 2,23% ao ano, bem maior que a do Estado que foi de 1,84% e a média nacional de 1,17%. A maior parte do crescimento na região ocorreu nas áreas urbanas. No Estado de Goiás, a população residente em áreas urbanizadas chegou a 90,30% em 2010. Para efeito de comparação, entre os anos de 2000 e 2010, no Brasil 84,36% da população residia em áreas urbanizadas, enquanto que na Região Centro-Oeste 88,80% da população residia em áreas urbanizadas. Na Região Metropolitana de Goiânia, os municípios mais populosos, Aparecida de Goiânia, Goiânia e Senador Canedo 99% da população reside em áreas urbanizadas. Ainda

de acordo com os dados censitários em 2010 a Região Metropolitana de Goiânia, constituída por 20 municípios, possuía uma população total de 2.173.141 habitantes, que estava distribuída em um território de aproximadamente 7.135,1 km², conferindo uma densidade demográfica aproximada de 297,07 hab/km². Três municípios, localizados na Região Metropolitana de Goiânia, estão entre as 10 maiores taxas anuais de crescimento de Goiás, sendo eles: Goianira com 6,17%, Senador Canedo com taxa de 4,74% e Santo Antônio de Goiás (4,21%).

A Região Metropolitana de Goiânia localiza-se entre as coordenadas 19°34'12" e 12°19'12" de latitude sul e 53°32'24" e 45°58'12" de longitude oeste. Foi criada pela Lei Complementar Estadual de número 27 em 30 de dezembro de 1999 e alterada pela Lei Complementar Estadual de número 78, aprovada em 25 de março de 2010. O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) divulgado pelo IBGE em 2000 foi de 0,812, um pouco mais elevado do que a média nacional de 0,800. De acordo com Peixoto et al. (2012), o desenvolvimento da Região Metropolitana de Goiânia se deve a vários fatores, entre eles a consolidação do agronegócio, instalação de empresas, aumento na oferta de serviços de saúde e educacionais, aumento na oferta de empregos, desenvolvimento de políticas habitacionais, e o conseqüente aumento populacional. Este nível de crescimento urbano acarreta como conseqüências, mudanças na paisagem, que outrora era composta por grandes áreas cobertas com vegetação nativa e vem sendo atualmente ocupadas por áreas urbanizadas, onde o solo foi intensamente impermeabilizado, podendo acarretar eventos consideráveis de aumento de temperatura de superfície (CALLEJAS et al. 2011).

De acordo com Wang et al. 2003 e Weng et al. 2007, existe uma correlação positiva entre a temperatura de superfície e a superfície impermeável, indicando claramente um aumento de temperatura em áreas de expansão urbana. Em dias quentes, as áreas urbanas podem apresentar temperaturas de 3,5° a 4,5°C maiores que as áreas circundantes, causando o efeito de ilha de calor urbano (FRUMKIM, 2002). O efeito de ilha de calor urbano é causado basicamente por dois fatores. O primeiro ocorre devido ao aumento das superfícies impermeabilizadas, principalmente as superfícies com altas absorvâncias, como estradas e telhados que absorvem de forma eficiente o calor da luz solar e tem a capacidade de irradiá-lo como radiação infravermelha térmica. Estas superfícies podem atingir temperaturas de 28° a 39°C, deixando o ar circundante ao seu redor mais quente. Em segundo lugar as áreas urbanas, geralmente, são relativamente desprovidas de vegetação, especialmente árvores, que

tem a função de fornecer sombra e resfriar o ar por meio da evapotranspiração (BHATTA, 2010).

Os efeitos agregados das ilhas de calor urbano sobre o clima regional ou global, podem ser melhor compreendidos por meio de dados do infravermelho termal adquiridos por meio de sensores acoplados em plataformas orbitais como o ASTER, MODIS, TM, ETM+ e TIRS. Estes dados podem ser utilizados para modelar o efeito da ilha de calor urbano e quantificar as contribuições dos diferentes materiais no efeito térmico. Importantes parâmetros podem ser mensurados por meio de Sensoriamento Remoto, incluindo cobertura do solo utilizando dados obtidos por sensores de alta resolução espacial tais como IKONOS ou Quickbird; variáveis biogeofísicas tais como albedo, cobertura vegetal, aerossóis e evapotranspiração, obtidas com dados de sensores de resolução espacial média como o ASTER, TM, ETM+ ou TIRS, ou mesmo de sensores com resolução espacial moderada como o MODIS, MERIS e AVHRR. Desta forma, o surgimento de plataformas orbitais dotadas de canais que medem a energia emitida pela superfície terrestre, viabilizou o uso de imagens obtidas por sensores a bordo de satélites e também a bordo de aeronaves para o estudo e investigação da temperatura superficial nas cidades (NETZBAND, STEFANOV & REDMAN, 2007).

A configuração espacial urbana, a taxa de crescimento, a dinâmica e os efeitos intrínsecos ao desenvolvimento e expansão do ambiente das cidades, podem ser estudados e analisados por meio de dados de Sensoriamento Remoto e programas computacionais de Sistemas de Informações Geográficas com o intuito de mapear, monitorar, mensurar e modelar a paisagem urbana. Mapas de crescimento urbano, originados de classificação de imagens orbitais fornecem informações confiáveis sobre a estrutura urbana a nível regional ou global. Esta abordagem pode ser de grande valia para ajudar os planejadores a avaliar a trajetória e velocidade da expansão de áreas urbanas, seus sistemas adjacentes, funções e estruturas.

OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o mapeamento e a análise da temperatura de superfície e suas consequências frente ao crescimento urbano na Região Metropolitana de Goiânia e obter estimativas futuras da temperatura de superfície, bem como as possíveis alterações climáticas por meio da previsão de temperaturas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

As etapas do trabalho que serão executadas para atingir o objetivo geral são elencadas abaixo:

- estimativa da temperatura da superfície na Região Metropolitana de Goiânia para o ano de 2014, por meio da utilização de imagens obtidas por sensor orbital;
- avaliação da dinâmica da temperatura de superfície, suas características e seus efeitos, na Região Metropolitana de Goiânia em períodos pretéritos, cerca de vinte anos, utilizando a análise temporal das imagens termais e multiespectrais de satélites em intervalos de quatro anos; e
- relacionamento da temperatura da superfície com o crescimento urbano através dos anos e execução de análise preditiva a fim de estimar a temperatura de superfície para os anos posteriores:

CAPITULO 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo está exposta a fundamentação teórica, necessária para o melhor entendimento a respeito de estimativa da temperatura de superfície por meio de imagens obtidas por sensores instalados a bordo de satélites, e sua dinâmica frente as alterações da cobertura do solo em áreas urbanas e não urbanas.

1.1 – CONCEITOS SOBRE O SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL

A teoria inicial do Sensoriamento Remoto termal baseia-se no conceito da Física de que todos os objetos do mundo real que apresentem uma temperatura acima de zero absoluto (-273,15 °C ou zero Kelvin) possuem movimentação das partículas de seus átomos e moléculas. Essas partículas se colidem e mudam seu estado de energia emitindo radiação eletromagnética. Quanto maior a temperatura da fonte, maior é a sua potência irradiante de energia (MENESES & ALMEIDA et al. 2012).

Como todos os objetos com temperatura acima de zero absoluto emitem radiação, Planck idealizou uma fonte padrão de radiação eletromagnética denominada de corpo negro e a quantidade de radiação de um corpo negro em equilíbrio térmico em um comprimento de onda λ e temperatura T é descrita pela lei de Planck apresentada na Equação 1.1 (LI et al. 2013).

$$B_{\lambda}T = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (1.1)$$

sendo que $B_{\lambda}T$ é a radiância espectral ($Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$) de um corpo negro a temperatura T(K) e comprimento de onda λ (μm); C_1 e C_2 são constantes físicas ($C_1 = 1,191 \times 10^8 W\mu m^4 sr^{-1} m^{-2}$, $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu m.K$).

No entanto, pelo fato da maioria dos corpos naturais não se comportarem como corpos negros, a emissividade, que é definida como a relação entre a radiância de um objeto e de um corpo negro na mesma temperatura, deve ser levada em consideração (LI et al. 2013). A emissividade é um fator que descreve o quão eficientemente um objeto irradia energia em comparação com um corpo negro (LILESSAND, KIEFER & CHIPMAN, 2004).

Então a radiância de um corpo natural (não negro) pode ser estimada pela emissividade espectral multiplicada pela lei de Planck, conforme a Equação 1.2.

$$B_{\lambda}T = \frac{C_1}{\ln\left(\frac{C_2 * \epsilon}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (1.2)$$

sendo ϵ a emissividade e $L_{\lambda,6}$ a radiância espectral no canal termal de imagens de satélites.

A Tabela 1 apresenta a emissividade média de diversos materiais que compõem a superfície terrestre (LILLESSAND, KIEFER & CHIPMAN, 2004).

Tabela 1 - Emissividades (ϵ) médias de alguns materiais da superfície terrestre entre 8 a 14 μ m.

<i>Material</i>	<i>Emissividade (ϵ)</i>
<i>Água destilada</i>	<i>0,99</i>
<i>Água</i>	<i>0,92-0,98</i>
<i>Gelo seco</i>	<i>0,97-0,98</i>
<i>Vegetação verde</i>	<i>0,96-0,99</i>
<i>Vegetação seca</i>	<i>0,88-0,94</i>
<i>Gramma</i>	<i>0,97</i>
<i>Solo úmido</i>	<i>0,95-0,98</i>
<i>Solo seco</i>	<i>0,92-0,94</i>
<i>Neve</i>	<i>0,83-0,85</i>
<i>Areia</i>	<i>0,9</i>
<i>Asfalto</i>	<i>0,95</i>
<i>Madeira</i>	<i>0,93-0,94</i>
<i>Tijolo</i>	<i>0,93-0,94</i>
<i>Rocha basáltica</i>	<i>0,92-0,96</i>
<i>Concreto</i>	<i>0,92-0,94</i>
<i>Rocha granítica</i>	<i>0,83-0,87</i>
<i>Vidro</i>	<i>0,77-0,81</i>

Fonte: Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).

Uma série de fatores determinam a emissividade de um objeto, tais como cor, composição química, rugosidade da superfície, umidade e outros. Como os sensores orbitais trabalham com conceitos de reflectância e emissividade, o conhecimento da relação entre estes dois fenômenos é de vital importância para o entendimento do Sensoriamento Remoto termal. Por definição a relação entre reflectância e emissividade é inversamente proporcional, ou seja, se a reflectância for alta a emissividade será baixa. Um exemplo prático dessa relação

pode ser dado por um corpo de água. Como a água absorve quase toda a energia do infravermelho e reflete muito pouco, a sua emissividade é próxima a 1, como se observa na Tabela 1. Outro exemplo pode ser dado pelo telhado metálico de um galpão, que apresenta uma alta reflectância, portanto a sua emissividade deverá ser mais baixa quando comparada a do corpo de água (MENESES & ALMEIDA et al. 2012). No entanto, o albedo dos materiais que compõem a superfície (Figura 1) também influencia a emissividade que é registrada pelos sensores remotos. De acordo com Menezes & Almeida et al. (2012), o albedo sofre influência da umidade do material que tende a reduzir o seu valor, aumentando, desta forma, sua capacidade de absorver e reemitir posteriormente essa energia. Observando a Tabela 1, nota-se que o solo seco apresenta valores de emissividade em torno de 0,92 a 0,94 e o solo úmido com sua emissividade aumentada, valores de 0,95 a 0,98. Partículas de solo úmido apresentam alta emissividade, semelhante à emissividade da água.

Figura 1 - Albedos em áreas urbanas e suas refletividades.

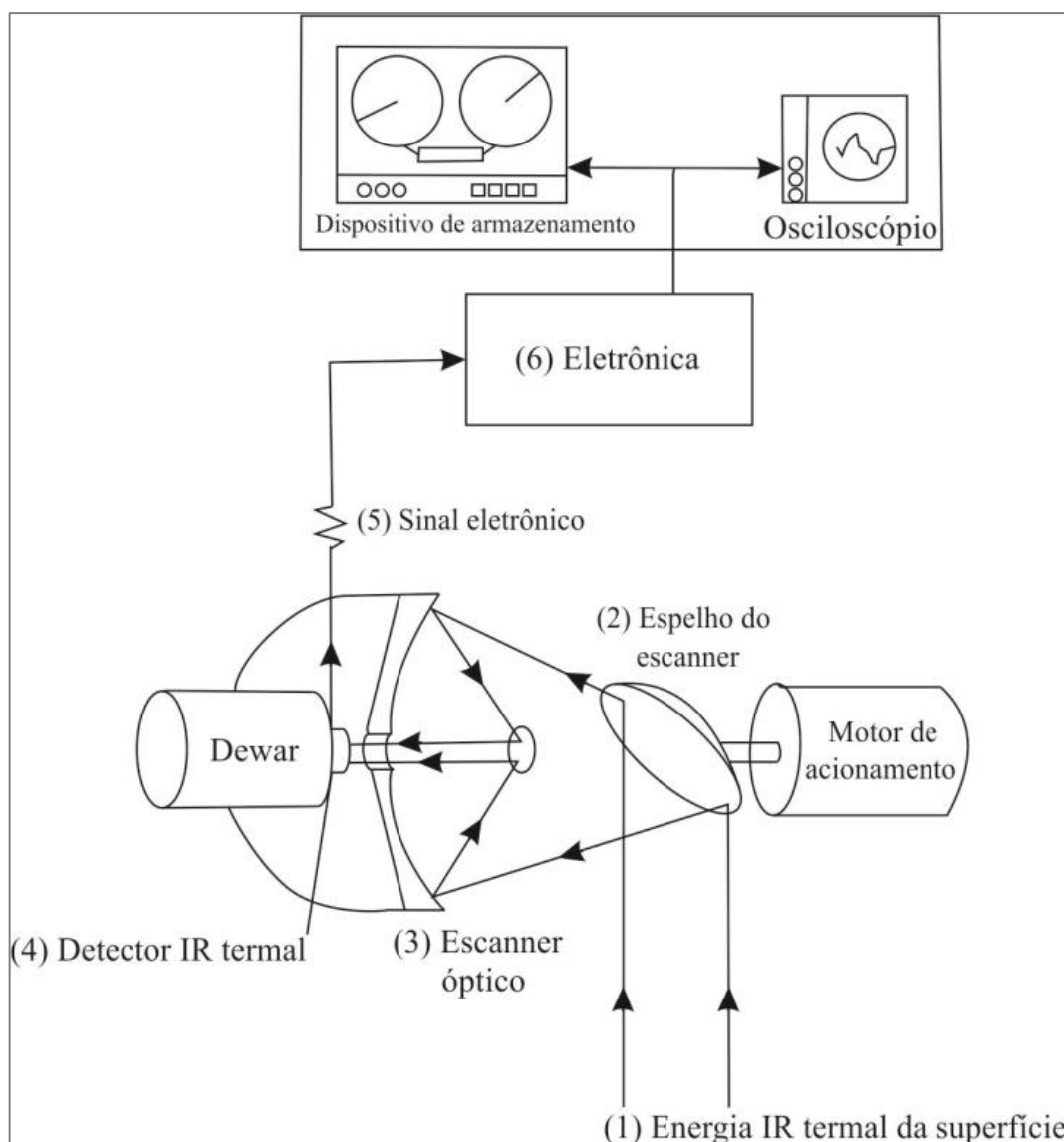


Fonte: Adaptado de Bias et al. (2003).

No entanto, a interpretação adequada da imagem termal, implica na compreensão básica dos elementos de um sensor termal e a natureza de sua operação. De acordo com Lillesand, Kiefer & Chipman (2004), um escaner térmico é meramente um tipo particular de digitalizador multiespectral, ou seja, um detector cuja principal característica é detectar

somente a parte térmica do espectro de radiação eletromagnética. Eles operam no princípio da interação direta entre os fótons da radiação incidente sobre eles e os níveis de energia dos portadores de cargas elétricas no interior do material detector (Figura 2).

Figura 2 - Esquema de um escaner termal.



Fonte: Adaptado de Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).

Para o máximo de sensibilidade os sensores devem ser resfriados a temperaturas próximas de zero absoluto para minimizar suas emissões térmicas. Normalmente o detector encontra-se rodeado por um componente denominado *Dewar* contendo nitrogênio líquido a 77 K. Um *Dewar* normalmente é um recipiente de parede dupla com isolamento que age

como uma garrafa térmica. Sua função é evitar que o líquido refrigerante aqueça a uma taxa muito rápida. A Figura 2 ilustra de forma esquemática o funcionamento básico de um sistema de escaner termal. O funcionamento ocorre da seguinte forma. A radiação no infravermelho termal no solo (1) é recebida pelo espelho escaner rotativo (2). O escaner óptico adicional (3) focaliza a energia que incide no detector de radiação infravermelho térmico (4), que é envolvido pelo *Dewar* contendo um fluido de arrefecimento composto de nitrogênio líquido. Os detectores convertem o nível de radiação de entrada para um sinal elétrico (5) que é amplificado pelo sistema eletrônico (6). Na próxima etapa o sinal (ou imagem) é exibida no monitor ou gravado digitalmente numa base linha por linha após uma conversão analógico-digital (LILLESSAND, KIEFER & CHIPMAN, 2004).

Uma imagem termal é uma representação pictórica da resposta do detector a radiação termal em uma base linha por linha (LILLESSAND, KIEFER & CHIPMAN, 2004). Os detectores são elementos com células fotoelétricas, convertem a luz (a radiação termal) em sinal eletrônico (Figura 2). Respondem à radiação neles incidentes por meio de um aumento de temperatura do material de que são construídos (Tabela 2), sendo que esses elementos químicos trabalham em um intervalo espectral particular. Esse aumento de temperatura provoca mudanças na resistência ou voltagem dos detectores produzindo um sinal eletrônico correspondente a essa mudança (MENESES & ALMEIDA et al. 2012).

Tabela 2 - Características dos Detectores de Fótons de Uso Comum.

Tipo	Abreviação	Intervalo espectral utilizado (μm)
Germânio dopado com mercúrio	Ge:Hg	3-14
Antimoneto de índio	In:Sb	3-5
Telureto de cádmio-mercúrio	Hg:Ce:Te	8-14

Fonte: Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).

De acordo com Lillesand, Kiefer e Chipman (2004), os sistemas atuais de imageamento termal são capazes de fornecer temperaturas com resolução da ordem de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Normalmente, quando se pensa em medidas de temperatura imagina-se que essas medidas envolvem algum instrumento de medição que está sendo colocado em contato ou imerso em um corpo cuja temperatura deve ser medida. Quando esse processo é executado a temperatura medida é denominada cinética. Conceitualmente a temperatura cinética diz respeito a uma

manifestação “interna” da energia translacional média das moléculas que constituem o corpo. Além desta manifestação interna, os objetos irradiam energia em função de sua temperatura. Essa energia emitida é uma manifestação “externa” do estado de energia de um objeto e é essa manifestação externa do estado de energia de um objeto que é detectada por Sensoriamento Remoto. Essa energia emitida é utilizada para determinar a temperatura radiante bem como as características da superfície da Terra (LILESSAND, KIEFER & CHIPMAN, 2004).

Para uma melhor compreensão das informações contidas no espectro termal torna-se necessário expor o conceito de transferência de calor. A transferência de calor, de acordo com Menezes & Almeida et al. (2012), é um fenômeno que ocorre de forma comum por meio de três processos:

- condução, processo em que o calor passa de partícula para partícula, desde a extremidade mais quente até a mais fria. É possível perceber este fenômeno segurando uma barra de metal próxima a uma fonte de calor ou um objeto aquecido;
- convecção, ocorre normalmente nos fluidos, quando o calor da fonte é transferido pela circulação de água ou do ar;
- radiação, transferência de calor que ocorre pelo espaço na forma de radiação termal.

Em várias aplicações de Sensoriamento Remoto termal o conhecimento da temperatura do objeto pode ser de grande relevância (ex. mapeamento dos padrões de nuvens, monitoramento das temperaturas da superfície do mar, detecção de ilhas urbanas de calor ou derrames de lavas), onde nesses casos se torna necessário determinar a relação entre temperatura cinética (T_{skin}) e temperatura radiométrica (T_{rad}) que é a medida da saída de temperatura de um objeto pelo sensor (MENESES e ALMEIDA et al. 2012; LILESSAND, KIEFER e CHIPMAN, 2004). Desta forma, a temperatura cinética (T_{skin}) de um objeto está relacionada a sua temperatura radiante (T_{rad}) pela Equação 1.3.

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} T_{skin} \quad (1.3)$$

De acordo com a Equação 1.3 para qualquer objeto a temperatura radiante medida por um sensor remoto será sempre menor do que a temperatura cinética deste mesmo objeto. Esse efeito é observado na Tabela 3, que apresenta as temperatura cinéticas (T_{skin}) e as

temperaturas radiantes (T_{rad}) de quatro objetos com a mesma temperatura cinética, mas com diferentes valores de emissividade (LILESSAND, KIEFER e CHIPMAN, 2004).

Tabela 3 - Temperatura cinética versus temperatura radiante para quatro tipos de materiais comuns.

Objeto	Emissividade (ϵ)	Temperatura cinética (T_{skin})		Temperatura radiante $T_{rad} = \epsilon^{1/4}T_{skin}$	
		K	°C	K	°C
Corpo negro	1,0	300	27	300,0	27,0
Vegetação	0,98	300	27	298,5	25,5
Solo úmido	0,95	300	27	296,2	23,2
Solo seco	0,92	300	27	293,8	20,8

Fonte: Adaptado de Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).

O último conceito considerado neste trabalho trata do fato dos sensores térmicos detectarem a radiação da superfície dos objetos no solo. Essa radiação pode ou não pode ser um indicativo da temperatura interna da massa deste objeto. Por exemplo, em um dia de umidade baixa, um corpo de água com temperatura alta irá manifestar efeitos de resfriamento devido ao processo de evaporação na superfície. Embora a temperatura da massa do corpo de água possa ser substancialmente mais quente do que a sua temperatura superficial, um sensor termal irá registrar somente a temperatura da superfície.

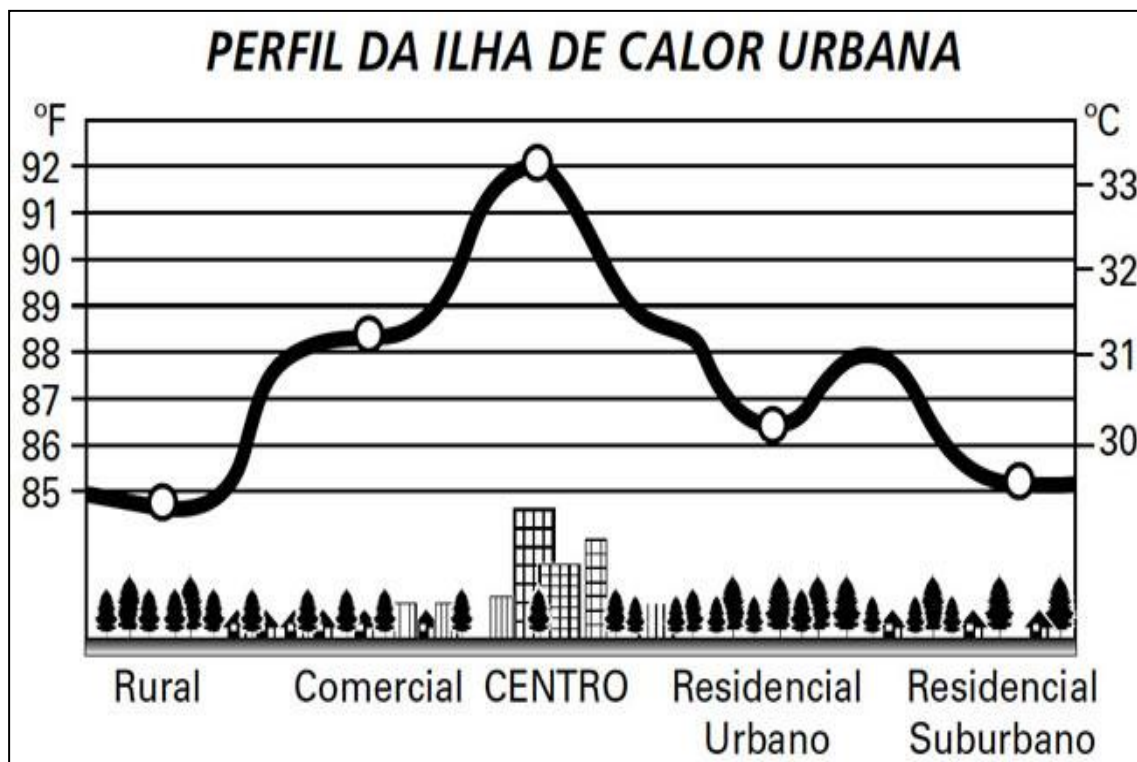
Pode-se concluir que o Sensoriamento Remoto termal é importante na estimativa da temperatura de superfície, que por sua vez é um importante parâmetro nos estudos termais urbanos e de sua dinâmica climática. A relação do clima urbano com o planejamento das cidades e sua influência na qualidade de vida dos cidadãos pode ser inferido por meio das trocas e do balanço de energia da superfície por meio da interação da radiação com a cobertura do solo (SOUZA & JÚNIOR, 2012). A aplicação do Sensoriamento Remoto termal em ambientes urbanos tem sido prática recorrente de diversos pesquisadores e planejadores ao redor do mundo e será apresentado no próximo tópico, que abordará os conceitos dos estudos termais por meio de dados orbitais em ambientes urbanos.

1.2 - O SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL EM ÁREAS URBANAS

As técnicas de Sensoriamento Remoto utilizando dados do infravermelho termal têm sido amplamente utilizadas em estudos de climas urbanos (WENG, 2009). A aplicação dessas técnicas são promissoras, tendo em vista que a temperatura de superfície, elemento que influencia os ambientes urbanos, tem estreita relação com distribuição da cobertura do solo e suas características (LO, QUATROCHI & LUVALL, 1997; WENG, 2001, 2003; WENG, LU & SCHUBRING, 2004). Desta forma, as propriedades físicas dos vários tipos de superfícies urbanas, sua cor, geometria das redes viárias, tráfegos de veículos e as diversas outras atividades antropogênicas são fatores importantes que ajudam a caracterizar a temperatura de superfície em ambientes urbanos (CHUDNOVSKY, BEN-DOR & SAARONI, 2004).

A influência e o efeito da temperatura de superfície nos ambientes urbanos é caracterizada pelo conceito da ilha de calor urbano, que trata da distribuição espacial e temporal de um campo de temperatura sobre a área urbanizada, que apresenta um valor máximo em sua amplitude e a sua distribuição se assemelha as curvas de nível da topografia que caracterizam uma ilha, neste caso as isotermas. Ocorre devido ao contraste térmico entre as áreas mais densamente urbanizadas e menos urbanizadas ou periféricas (Figura 3). De acordo com Bhatta (2010), a intensificação dos efeitos da ilha de calor urbano não é causada somente pela morfologia das áreas metropolitanas, mas também a mudança climática global contribui para esse aquecimento devido ao aumento na produção de gases de efeito estufa resultando em aumento da condução térmica. Desta forma, de acordo com Netzband, Stefanov & Redman (2007), esses efeitos variam desde microescalas, ou escalas regionais (por exemplo, substituição de árvores em um parque por estacionamento) a macroescalas (efeitos do dióxido de carbono sobre o clima global devido à emissão por meio da queima de combustíveis fósseis).

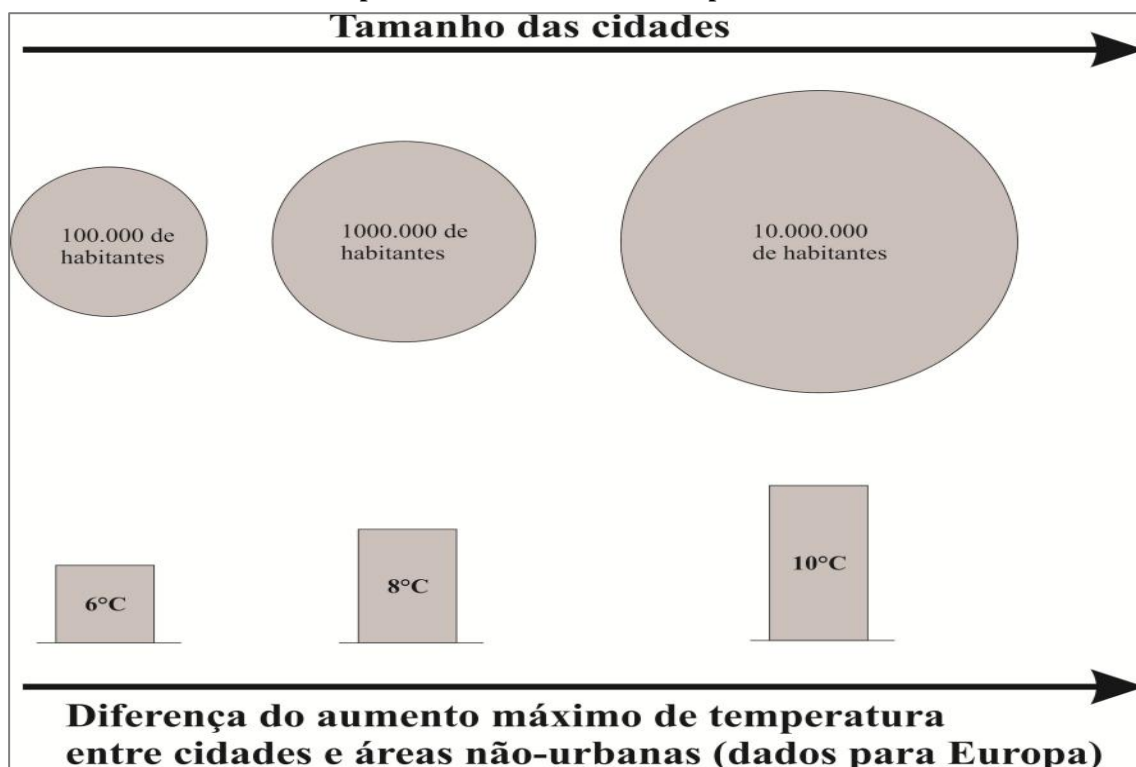
Figura 3 - Perfil teórico de ilha de calor urbano (ICU).



Fonte: Adaptado de Bias et al. (2003).

No entanto Bhatta (2010), afirma que uma análise do ambiente térmico urbano deve abordar, também, dados demográficos, tendo em vista que o número de habitantes também é um fator condicionante decisivo para a ocorrência de alterações termais significativas. A Figura 4 mostra a relação entre o aumento das cidades (representados por círculos) e o aumento do número de habitantes com o incremento da temperatura urbana.

Figura 4 - Aumento do tamanho das cidades e do número de habitantes podem causar aumento da temperatura urbana.



Fonte: Adaptado de Bhatta (2010).

De fato, o conceito de clima urbano pode ser entendido tanto como uma função da estrutura urbana e suas atividades, bem como por meio de diferentes condições físicas e culturais (NETZBAND, STEFANOV & REDMAN, 2007). Oke (1997) sugere que os ambientes urbanos demonstram a evidência mais forte que se pode ter do potencial das atividades humanas nas mudanças climáticas. Os fatores que contribuem para o excesso de calor em áreas urbanas podem ser caracterizadas da seguinte forma (NETZBAND, STEFANOV & REDMAN, 2007):

- a) o aumento da área superficial responsável pela absorção da energia solar devido à concentração de edifícios de vários andares;
- b) as taxas de absorção e armazenamento de calor devido a diferentes materiais durante o dia (albedo), os materiais que constituem o ambiente urbano diferem em suas características de reflexão e emissão da radiação térmica em relação às áreas rurais ou compostas de paisagens naturais.
- c) impermeabilidade relativa das superfícies, diminuição da vegetação e da quantidade de lagos;

- d) o arranjo geométrico das construções e seu efeito na retenção de calor (Cânion urbano). Esse arranjo se origina do protótipo geométrico definido pelas construções e ruas das cidades, corresponde a cavidade do ar acima das ruas, limitado lateralmente pelas paredes das edificações.
- e) o calor emitido dos prédios e telhados;
- f) emissões de gases ocasionado pelo aumento do fluxo de transportes nas vias públicas; e
- g) a geografia do uso do solo nas cidades e suas alterações.

A Tabela 4 fornece um resumo das alterações típicas dos elementos climáticos nas cidades em comparação com as áreas rurais (OKE, 1997).

Tabela 4 - Efeitos climáticos urbanos para uma cidade de latitude média, com cerca de 1.000.000 (um milhão) de habitantes. (Valores para o verão, a menos que indicado de outra forma).

Variável	Mudança	Magnitude/Comentários
Intensidade de turbulência	Maior	10-50%
Velocidade do vento	Diminuição	5-30% em torno de 10m em fluxo forte
	Aumento	Em fluxo fraco, com ilha de calor
Direção do vento	Alterado	Em torno de 1-10°
Radiação UV	Muito menor	25-90%
Radiação solar	Menor	1-25%
Entrada de radiação infravermelha	Maior	5-40%
Visibilidade	Reduzida	
Evaporação	Menor	Cerca de 50%
Fluxo de calor convectivo	Maior	Cerca de 50%
Armazenamento de calor	Maior	Cerca de 200%
Temperatura do ar	Aquecida	1-3°C por 100 anos. 1-3°C em média anual até 12°C na média horária
Umidade	Seca	Período de verão
Nuvem	Mais úmida	A noite no verão e durante o dia no inverno
	Mais neblina	Na cidade e a sotavento desta
	Maior ocorrência (mais nuvem)	Especialmente a sotavento da cidade
Nevoeiro e/ou neblina	Mais e/ou menos	Depende da quantidade de aerosol e os arredores
Precipitação	Não-Medido	Não-Medido
Neve	Menor	
Tempestades	Maior	
Tornados/ciclones	Menor	
Total	Maior?	A sotavento, em vez da cidade

Fonte: Adaptado de Oke (1997), pág. 275.

Normalmente, em dias nublados ou com incidências de ventos é possível notar a redução da magnitude das ilhas de calor nas cidades. Climatologistas urbanos, planejadores e o poder público descobriram que questões científicas sobre o aquecimento da área urbana giram em torno de vários fatores que devem ser considerados na área de mitigação. Por exemplo, o uso criterioso de vegetação para o sombreamento diurno, uso de materiais refletivos, considerações sobre a densidade de sombra ocasionada pelas estruturas construídas e o remanejamento da geometria urbana visando o aproveitamento da ventilação natural, o resfriamento pela evapotranspiração a partir de lagos e parques para reduzir a enorme carga de calor durante o dia (NETZBAND, STEFANOV & REDMAN, 2007). Políticas de planejamento visando o redesenho urbano podem ser utilizadas para mitigar o efeito de aquecimento. Alguns autores (ARENDRT 1996; CALTHORPE & VAN DER RYN 1986; PIJAWKA & SHETTER 1995; STEINER 2000; THAYER 1994; THOMPSON & SORVIG 2000), propõem a construção de estradas mais estreitas, mais espaços verdes intercalados com as áreas construídas, uso de materiais com altos valores de albedo, principalmente para telhados e ruas e maior uso de sombreamento, como práticas para mitigar o aquecimento e reduzir o seu impacto. Tais práticas foram comuns em cidades com ambientes desérticos ao redor do mundo, mas caíram em desuso devido ao projeto arquitetônico contemporâneo e o planejamento urbano (NETZBAND, STEFANOV & REDMAN, 2007).

O clima das cidades continuará a ser um fenômeno relevante, tendo em vista o crescimento da população nas próximas décadas. Como demonstrado nos parágrafos anteriores, neste tópico, o Sensoriamento Remoto será essencial no estudo do clima urbano devido a sua visão sinóptica necessária para modelar e compreender as interações entre os processos naturais e a modificação causada pelas atividades humanas. Dados de sensores remotos de resolução moderada (30m/pixel – visível e infravermelho próximo e 120m/pixel – infravermelho termal) podem melhorar significativamente nossa capacidade de monitorar e modelar a ilhas de calor urbanas, adquirindo dados de temperatura de superfície e de cobertura do solo de forma contínua. No entanto, a recuperação da temperatura de superfície por meio de imagens de satélites não é tarefa simples. Vários algoritmos de estimativa de temperatura por imagens de Sensoriamento Remoto foram desenvolvidos desde os primórdios dos sensores termais a nível orbital. Uma extensa revisão bibliográfica sobre esses algoritmos, suas características técnicas e suas aplicações deve ser considerada na

abordagem de estudos climáticos em áreas urbanas. Desta forma, no próximo tópico é feita uma revisão sobre os algoritmos de estimativa de temperatura de superfície por meio de imagens orbitais, exemplos de aplicação, estudos consagrados e seus resultados.

1.3 – ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE POR SENSORIAMENTO REMOTO.

A importância da estimativa da temperatura da superfície está sendo cada vez mais reconhecida e existe, atualmente, grande interesse no desenvolvimento de metodologias a fim de medir a temperatura a partir do espaço (LI et al. 2013). Este tópico se concentra na revisão de algoritmos de estimativa da temperatura a partir de sensores remotos de órbita polar devido ao seu uso difundido, sua aplicabilidade regional e global e sua melhor resolução espacial comparativamente aos satélites geoestacionários.

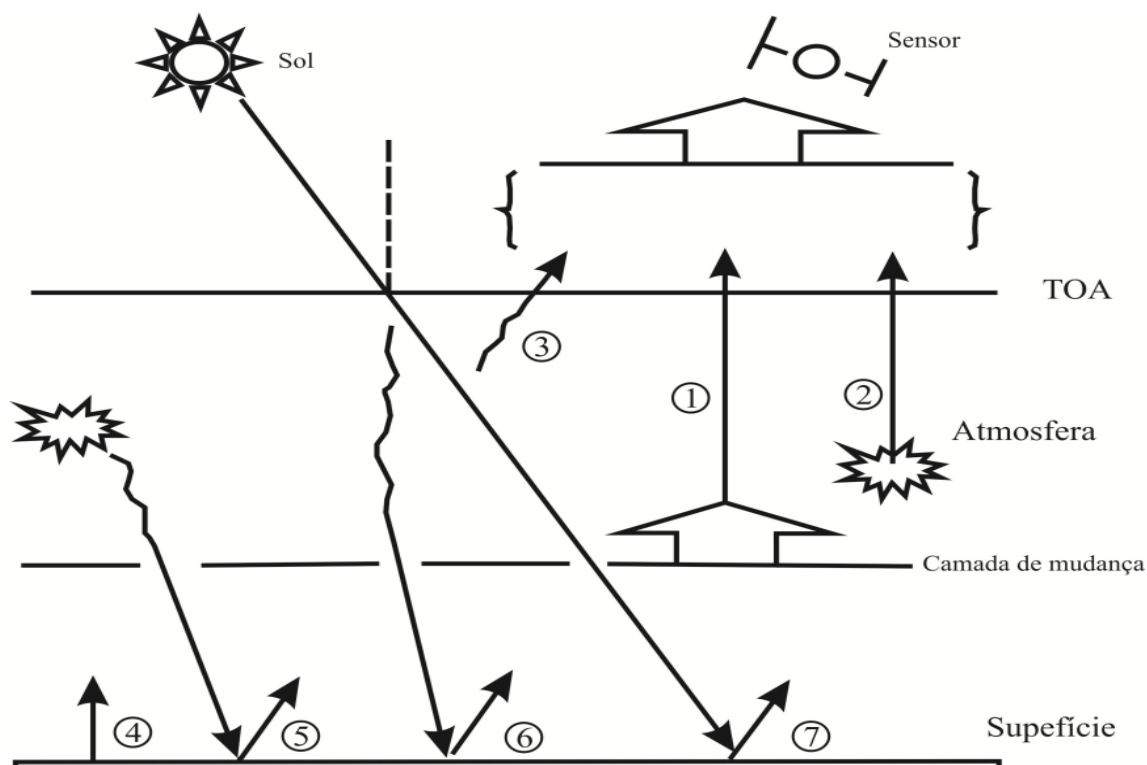
Devido à alta heterogeneidade das características da superfície terrestre, tais como topografia, vegetação e variação da cobertura e uso do solo (LI et al. 2006; NETELER, 2010), a temperatura da superfície muda rapidamente no espaço e no tempo (PRATA et al. 1995; VALCLIN et al. 1982), conseqüentemente uma caracterização adequada da distribuição da temperatura e sua evolução temporal exigem medidas com detalhada amostragem espacial e temporal (LI et al. 2013).

No entanto, uma estimativa direta da radiação emitida pela temperatura na região espectral do infravermelho termal é difícil de ser executada com precisão, já que as radiâncias medidas pelos escâners a bordo dos satélites não dependem apenas dos parâmetros da superfície (temperatura e emissividade), mas também os efeitos atmosféricos (LI & BECKER, 1993; OTTLÉ & STOLL, 1993; PRATA et al. 1995). Portanto determinar a temperatura a partir do espaço requer além de correções atmosféricas e de emissividade (LI & BECKER, 1993; VIDAL, 1991).

Vários autores (BECKER & LI, 199b; GILLESPIE et al. 1998; HOOK et al. 1992; JIMÉNEZ-MUÑOZ & SOBRINO, 2003; KEALY & HOOK, 1993; KERR et al. 1992; POZO VAZQUEZ et al. 1997; PRICE, 1983, 1984; QUIN et al. 2001; SUSSKIND et al. 1984; TONOOKA, 2001; WAN & DOZIER, 1996; WAN & LI, 1997), realizaram estudos e propuseram diferentes abordagens para estimar a temperatura de superfície a partir de dados do infravermelho termal, utilizando uma variedade de métodos para lidar com a emissividade

e os efeitos atmosféricos. As correções atmosféricas não são simples de serem implementadas. A presença da atmosfera entre a superfície e o sensor afeta a radiância medida pelo escâner ou radiômetro no topo da atmosfera. Essas radiações que resultam principalmente da emissão/reflexão da superfície são moduladas pelos efeitos de atenuações e emissões da atmosfera. Desta forma, as correções atmosféricas consistem em corrigir o brilho medido pelos sensores dos efeitos da atenuação atmosférica, emissão e emissão/reflexão (PERRY & MORAN, 1994). Consequentemente, tem sido bastante grande o número de publicações sobre algoritmos e métodos para estimar a temperatura de superfície. (LI et al. 2013). O efeito atmosférico sobre a radiância termal que chega ao sensor é ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 - Ilustração do efeito atmosférico sobre a radiância termal.



Fonte: Adaptado de Li et al. 2013.

Por meio da Figura 5 nota-se que o caminho 1 corresponde a radiância observada ao nível do solo atenuada pela atmosfera. Os caminhos 2 e 3 representam a radiância termal atmosférica ascendente e a radiância solar difusa ascendente resultante do espalhamento atmosférico da radiância solar, respectivamente. O caminho 4 representa a radiância emitida diretamente pela superfície. Os caminhos 5 e 6 representam a radiância termal atmosférica

descendente e a radiância solar difusa refletida pela superfície. A radiância solar difusa refletida diretamente pela superfície é representada pelo caminho 7.

De acordo com Li et al. 2013, ao longo das últimas décadas a estimativa da temperatura de superfície a partir de dados do infravermelho termal melhorou significativamente. Muitos algoritmos foram propostos para tratar as características dos diferentes sensores a bordo dos diferentes satélites. De um modo geral estes algoritmos podem ser agrupados em três categorias, sendo elas:

- com conhecimento prévio da emissividade. São os métodos de canal simples (single-channel), multi-canais (multi-channel) e os métodos multi-ângulos (multi-angles);
- se a emissividade não é conhecida, os algoritmos são categorizados em três tipos. Método de recuperação gradual (stepwise), recuperação simultânea da emissividade e da temperatura de superfície com conhecimento das informações atmosféricas e recuperação simultânea com a informação atmosférica desconhecida.

Torna-se difícil afirmar a existência de um método universal capaz de estimar com precisão a temperatura de superfície de todos os dados do infravermelho termal de todos os satélites, porque os métodos de estimativa de temperatura foram propostos para a sua utilização em diferentes condições e assumindo pressupostos diferentes.

A validação é uma técnica que permite que métodos, algoritmos ou parâmetros derivados de dados de Sensoriamento Remoto possam ser utilizados com confiança. Desta forma, como a temperatura de superfície a partir de dados do canal do infravermelho termal por meio do Sensoriamento Remoto envolve correções nas radiâncias e/ou brilhos observados pelos satélites, associados às emissividades e aos efeitos atmosféricos, torna-se necessário avaliar a precisão desta estimativa e proporcionar aos pesquisadores e usuários informações confiáveis sobre a qualidade do produto gerado (LI et al. 2013). Poucos estudos têm sido realizados para validar a temperatura de superfície a partir de dados de Sensoriamento Remoto orbital devido à dificuldade de fazer medições terrestres de dados de temperatura que sejam representativos nas escalas dos pixels das imagens orbitais e, também, devido as grandes variações espaciais e temporais na própria temperatura. No entanto, os estudos realizados nos últimos anos para validar as temperaturas de superfície derivadas de uma grande variedade de sensores, se concentraram, em grande parte, em alvos homogêneos (LI et al. 2013).

Os sensores que foram submetidos a técnicas de validação incluem TM / ETM+ (Thematic Mapper / Enhanced Thematic Mapper Plus), ASTER, AVHRR, AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer), MODIS e SEVIRI (COLL et al. 2005, 2010, 2012b; HOOK et al. 2005, 2003, 2007; HULLEY & HOOK, 2009a; NICLÒS et al. 2011; PRATA, 1994b; SABOR et al. 2009; SAWABE et al. 2003; SOBRINO et al. 2007; SÒRIA & SOBRINO, 2007; TRIGO et al. 2008a,b; WAN, 2008; WAN & LI, 2008; WAN et al. 2002, 2004; WANG & LIANG, 2009). Uma análise dos trabalhos dos autores apresentados acima demonstra que geralmente são utilizados três métodos para validar os valores de temperatura de superfície a partir de dados de Sensoriamento Remoto orbital: o método baseado na temperatura (T-based), o método baseado na radiância (R-based) e o método de validação cruzada (Cross-validation). Estes métodos podem ser considerados estratégias complementares para avaliar os produtos de temperatura de superfície por satélites (LI et al. 2013).

O método T-based é um método que compara a temperatura de superfície com a temperatura dos dados em terra, isto é, das estações meteorológicas (COLL et al. 2005; PINKER et al. 2009; PRATA, 1994b; SLATER et al. 1996; WAN et al. 2002). É importante que os dados das estações meteorológicas sejam coletados no momento da passagem do satélite pela região, ou próximo a esse instante devido a alta variabilidade temporal da temperatura na superfície. Outro fator que deve ser considerado, de acordo com Li et al. (2013) é a diferença entre as escalas dos dados em campo (alguns m^2 ou cm^2) com os dados dos satélites (alguns km^2). Além disso, a cobertura natural do solo e os seus correspondentes valores de temperatura e emissividade podem ser bastante variáveis na escala de alguns km^2 (LI et al. 2013).

Autores como SNYDER et al. 1997; COLL et al. 2005; GUILLEVIC et al. 2012; SOBRINO et al. 2004c; WAN, 2008 apontaram que superfícies homogêneas e planas podem ser facilmente caracterizadas e apresentam grande potencial como locais de validação. Devido ao fato de a maior parte da superfície ser bastante heterogênea nos dados em escala de pixels dos satélites, as validações por este método são escassas e se concentram a poucos tipos de superfícies homogêneas, tais como lagos, pastagens e campos agrícolas, utilizando dados coletados em várias campanhas de campo (LI et al. 2013). De fato (LEITE & BRITO, 2012) fizeram uma comparação entre o modelo SEBAL, desenvolvido por Bastiaanssen et al. (1995) e o modelo de Maralet et al. (1985) e validaram pelo método T-based utilizando três estações

meteorológicas, na bacia do Rio Vieira, no norte do Estado de Minas Gerais. Tendo em conta que uma bacia hidrográfica pode ser considerada como uma superfície homogênea, concluíram que a temperatura obtida por meio do SEBAL oscilou em relação aos dados fornecidos pelas estações meteorológicas entre 0,38°C e 0,43°C. O modelo de Maralet et al. (1985) apresentou uma oscilação entre 1,6°C e 2,87°C.

De acordo com Li et al. (2013) e Wan et al. (2002), a principal vantagem do método T-based é o fato de proporcionar uma avaliação direta da qualidade radiométrica do sensor e a capacidade do algoritmo de obtenção da temperatura de superfície em corrigir os efeitos atmosféricos e de emissividade. No entanto o sucesso das validações por meio deste método depende fundamentalmente da precisão das medidas de temperatura em solo e de como elas podem ser representadas nas escalas dos pixels dos satélites. Outro fator limitante trata da implantação de várias estações meteorológicas para medir esta temperatura em solo, especialmente sobre superfícies heterogêneas. Ainda, de acordo com Li et al. (2013), devido ao fato das medidas em solo serem uma tarefa exigente, limitada a curto prazo e com longas campanhas de campo, o método T-based pode não ser apropriado para a validação global de medidas de temperatura de superfície derivadas de imagens de satélites.

O segundo método, denominado R-based, ou baseado em radiância, trata-se do método mais sofisticado entre os três citados. De acordo com Wan (2008) e Wan & Li (2008), este método não depende dos valores de temperatura de superfície medidos em solo, mas exige o conhecimento das emissividades, as quais podem ser medidas em campo, estimadas a partir dos tipos de cobertura do solo ou a partir de outros dados auxiliares e perfis atmosféricos medidos sobre o local no momento da passagem do satélite. Este método utiliza a temperatura de superfície estimada por satélites, bem como os dados de perfis atmosféricos e as emissividades em solo como parâmetros de entrada iniciais para um modelo de transferência radiativa (MTR) atmosférico que simula o brilho no topo da atmosfera no momento da passagem do satélite. Usando a diferença entre a radiância e/ou brilho simulada no topo da atmosfera e o brilho medido, a temperatura de superfície inicial é ajustada e o brilho simulado será iterativamente recalculado para combinar com o brilho medido pelo satélite. A diferença entre a temperatura de superfície ajustada e a temperatura inicial derivada do satélite é a precisão da temperatura de superfície estimada pelo satélite. Wan & Li (2008) fornecem mais detalhes sobre o método R-based.

Como este método não exige medições de temperatura de superfície em campo, consequentemente pode ser aplicado a superfícies sobre as quais medidas de temperatura de superfície são impraticáveis e estendida para superfícies homogêneas e não-isotérmicas. O desempenho deste método é promissor permitindo validar os valores de temperatura de superfície durante o dia e a noite sobre superfícies homogêneas e não-isotérmicas. No entanto, também oferece algumas limitações fortes, como o uso de representações de emissividades medidas ou estimadas na escala do pixel dos satélites, a necessidade de verificação de uma atmosfera livre de nuvens e a forma como os perfis atmosféricos utilizados nas simulações representam a atmosfera real no momento das observações (COLL et al. 2012b).

O método de validação cruzada (Cross-validation) envolve a validação cruzada ou a comparação dos valores de temperatura de superfície obtidos com os valores de temperatura bem documentados e validados de outros satélites. (TRIGO et al. 2008a). Este é um método considerado alternativo para validação da temperatura de superfície se não existirem perfis atmosféricos ou dados de temperatura em solo ou mesmo se as validações pelo método T-based ou R-based não puderem ser executados (LI et al. 2013).

A principal vantagem deste método é que a temperatura de superfície pode ser validada sem quaisquer medidas no terreno, podendo ser utilizado em qualquer lugar, qualquer tipo de superfície e em qualquer escala (local, regional ou global), se os produtos de temperatura de referência forem bem validados e precisos. No entanto, a precisão deste método é sensível a descasamentos temporais e espaciais entre as duas medidas de temperatura (a estimada e a de referência). Desta forma o intervalo de tempo entre as duas medidas deve ser o mais curto possível. Deve-se ter em conta que os valores de emissividade dependem do ângulo de visualização zenital do satélite e que os pixels dos dois sensores abrangem áreas diferentes e contêm informações da superfície terrestre sob diferentes ângulos de visão, desta forma, somente imagens que contenham pixel sob os mesmos ângulos de visualização zenital ou com ângulos próximos devem ser utilizados na validação cruzada (LI et al. 2013).

Souza, Arantes & Ferreira (2012), utilizaram este método de validação em um estudo sobre as temperaturas superficiais em ambiente pantaneiro, onde os dados termais da plataforma Landsat-7, sensor ETM+, foram avaliados e validados por meio de dados do produto MODIS MOD11A1. Os autores encontraram diferenças de até 7°C entre as áreas

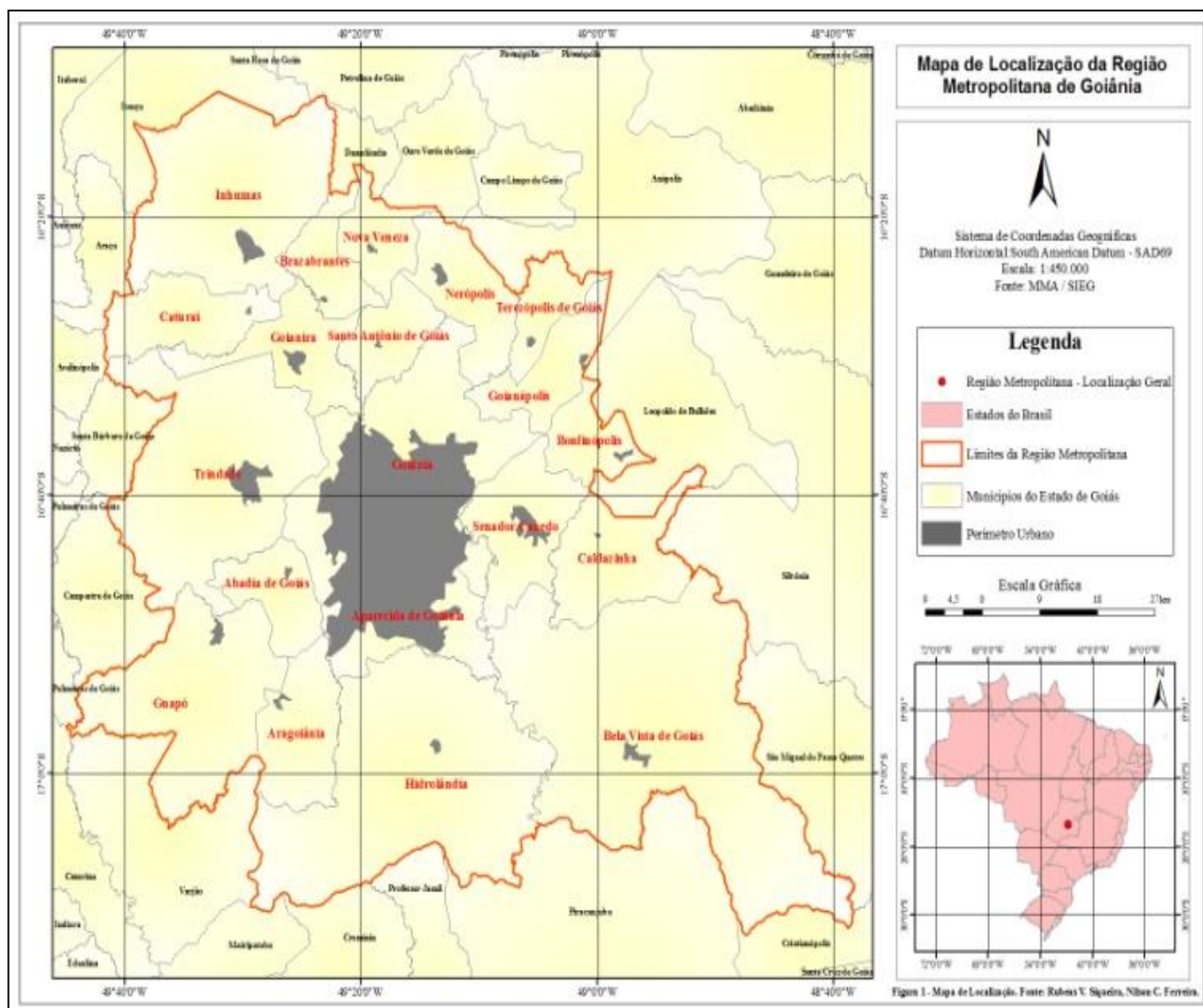
antropizadas e vegetadas e os dois produtos de temperatura de superfície apresentaram correlação $r^2 = 0,73$, com um erro médio quadrático de $1,59^\circ\text{C}$.

CAPÍTULO 2. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E EXPANSÃO URBANA NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA – GO

A expansão ou crescimento urbano tem sido tema de destaque em estudos e análises que tem como objetivo avaliar o desenvolvimento sustentável das cidades. Análises do crescimento urbano apoiadas na configuração espacial mapeada por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto se tornou assunto predominante em estudos atuais. Em décadas recentes, a análise do crescimento urbano e suas consequências tornou-se uma operação essencial realizada por várias razões (BHATTA, 2010). Um problema comum nas áreas urbanizadas ao redor do mundo tem sido o incremento da temperatura, que vem acarretando a formação e intensificação das ilhas de calor urbanas. Esse tipo de estudo é importante pois as intensificações das ilhas de calor urbanas podem acarretar aumentos dos consumos de energia e água, mudanças na biodiversidade local e desconforto nos habitantes. Regiões densamente urbanizadas ou periurbanizadas, tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento apresentam, muitas vezes, diminuição da qualidade do ar devido a processos industriais, aumento da utilização de veículos automotores, incremento na queima de combustíveis fósseis, intensificação de atividades agrícolas e impermeabilização do solo (NETZBAND et al. 2007).

A Região Metropolitana de Goiânia criada pela Lei Complementar Estadual nº 27 consiste na agregação administrativa das cidades ao redor de Goiânia, capital do Estado de Goiás e engloba, atualmente, vinte municípios. De acordo com os últimos levantamentos censitários, em 2010 a população da região metropolitana totalizava 2.173.141 habitantes, distribuídos em um território de 7.315,10 km², conferindo uma densidade demográfica aproximada de 297,07 hab/km². A Região Metropolitana de Goiânia, localiza-se inteiramente no Bioma Cerrado, entre as coordenadas 19°34'12" e 12°19'12" de latitude sul e 53°32'24" e 45°58'12" de longitude oeste (Figura 6).

Figura 6 - Localização da Região Metropolitana de Goiânia.



Fonte: O autor.

De acordo com Peixoto et al. (2012), o desenvolvimento da Região Metropolitana se deve a vários fatores, entre eles a consolidação do agronegócio, instalação de empresas, aumento na oferta de serviços de saúde e educacionais, aumento na oferta de empregos, desenvolvimento de políticas habitacionais, e o consequente aumento populacional. Este nível de crescimento urbano acarreta como consequências, mudanças na paisagem, que outrora era composta por grandes áreas cobertas com vegetação nativa e vem sendo atualmente ocupadas por áreas urbanizadas, onde o solo foi intensamente impermeabilizado (CALLEJAS et al. 2011).

De acordo com Voogt & Oke (2003), o estudo da temperatura de superfície fornece dados e informações que são necessários para o entendimento da climatologia urbana. A temperatura superficial modula as camadas mais baixas da atmosfera urbana, ajuda a determinar o clima interno das edificações, afetando o conforto de ambientes internos, por meio dos efeitos decorrentes das trocas de energia. As mudanças no uso e cobertura do solo, de acordo com Callejas et al. (2001), causam alterações na dinâmica do movimento do ar, acarretando aumento das temperaturas nas cidades, fenômeno conhecido como ilha de calor urbano.

Com o surgimento de plataformas orbitais, dotadas de sensores que medem a energia radiante da superfície terrestre, viabilizou-se o uso de imagens de satélites e aeronaves para o estudo e investigação da temperatura superficial nas cidades. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a temperatura de superfície na Região Metropolitana de Goiânia, e sua relação com a expansão urbana no período de dois anos, bem como a sua distribuição espacial e dinâmica, por meio da utilização de imagens obtidas por sensor instalado a bordo de satélite.

2.2 – MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do trabalho, foram utilizadas imagens obtidas pelo sensor *Thematic Mapper*, instalado a bordo do satélite Landsat-5. Devido a localização e abrangência geográfica da Região Metropolitana de Goiânia, foram necessárias aquisições de imagens das órbitas/ponto 221/71, 221/72, 222/71 e 222/72. As imagens foram adquiridas, pelo sensor orbital, em dois anos distintos, 1997 e 2008. O acesso às imagens foi realizado via Internet por meio da página do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) localizada no seguinte endereço eletrônico: <https://www.dgi.inpe.br>. As imagens, selecionadas com cobertura mínima de nuvens, são datadas como segue: órbitas/ponto 221/71 e 221/72 datas de 01/07/1997 e 16/08/2008, respectivamente; órbitas/ponto 222/71 e 222/72, datas de 24/07/1997 e 23/08/2008, respectivamente.

De posse das imagens, foi realizado o processo de calibração radiométrica, onde os números digitais foram convertidos em valores de radiância espectral. Na etapa seguinte foi realizada a conversão da radiância espectral para a reflectância no topo da atmosfera (ToA) ou de superfície. As imagens foram produzidas em diferentes datas o que obrigou a realização destas correções para eliminação de inconsistências no conjunto de imagens, devido os diferentes ângulos solares zenitais, compensação dos valores diferentes de irradiância exo-atmosférica decorrentes da diferença das bandas espectrais, e correção da variação da distância Terra-Sol. A realização destas correções são obrigatórias em atividades multi-temporais e na concateção de imagens (Chander et. al. 2009). Para converter os números digitais das imagens para radiância espectral foram utilizados os valores de bias e ganho que acompanham os arquivos de metadados das imagens (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de ganho e bias para as cenas Thematic Mapper utilizadas no estudo.

Banda/periodo	Ganho	Bias
TM3/1997 e 2008	1,03988	-1,17
TM4/1997 e 2008	0,872588	-1,51
TM5/1997 e 2008	0,119882	-0,37
TM6/1997 e 2008	0,0551576	1,2378

Fonte: O autor.

De posse dos valores explicitados na Tabela 5, procedeu-se a aplicação da Equação 1.4 proposta por Chander & Markham (2003) e Chander et al. (2009).

$$L_{\lambda} = \text{ganho} * \text{DN} + \text{bias} \quad (1.4)$$

onde L_{λ} é o valor de radiância para o pixel, DN é o número digital (Digital Number) de cada pixel da imagem, *ganho* e *bias* disponíveis nos arquivos de metadados das imagens. A etapa seguinte consistiu da conversão das imagens resultantes da aplicação da Equação 1.4 para a reflectância no topo da atmosfera (ToA) ou reflectância de superfície, aplicando às imagens a Equação 1.5, Chander & Markham (2009).

$$\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * d^2 / ESUN_{\lambda} * \cos(\theta_s) \quad (1.5)$$

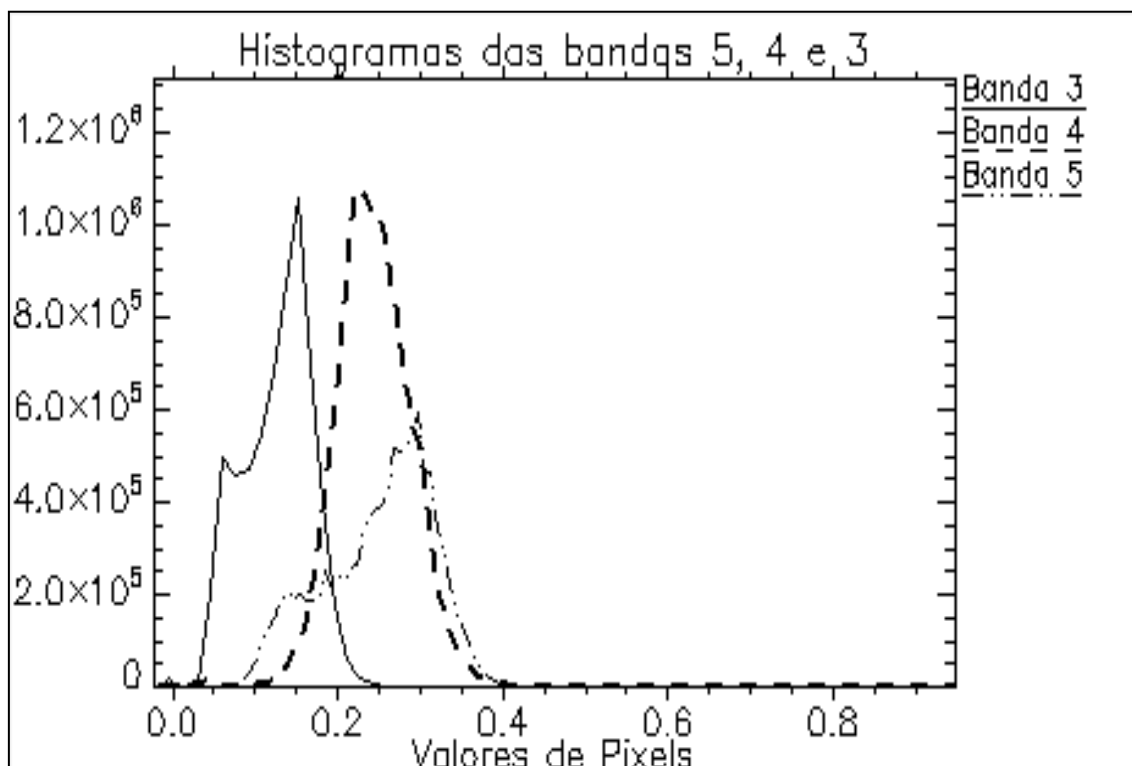
onde ρ_{λ} é a reflectância aparente no topo da atmosfera (ToA), L_{λ} é a imagem da radiância espectral, d é a distância Terra-Sol para o dia do ano em unidades astronômicas, $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar exo-atmosfera e θ_s o ângulo zenital solar em graus.

Finalizadas as etapas de pré-processamento, as imagens foram espacialmente concatenadas e então recortadas utilizando o polígono limite da região de estudo.

O mapa de cobertura do solo foi elaborado por meio do processamento digital das imagens multiespectrais Landsat-5/TM aplicando classificação supervisionada utilizando o método de *Battacharya*. O classificador por regiões *Battacharya* foi adotado tendo como critério uma otimização no processo de coleta das amostras de treinamento, devido ao fato das regiões serem delimitadas pelo processo de segmentação de imagens, e também por este algoritmo utilizar além da informação espectral de cada pixel, a informação espacial que envolve a relação entre os pixels e seus vizinhos, reconhecendo áreas homogêneas na imagem, baseado nas propriedades espectrais e espaciais da imagem.

Em seguida, foi realizada a seleção das bandas que melhor diferenciam os alvos da superfície da Região Metropolitana de Goiânia. O objetivo foi encontrar um conjunto de três bandas onde fosse possível ter a resposta espectral distinta de cada tipo cobertura do solo. Desta forma, foram analisados os histogramas das bandas de 1 a 5 e 7, para indicar assim qual composição de três bandas foi a mais adequada para a classificação, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Histogramas das bandas 5, 4 e 3.



Fonte: O autor.

Analisando os picos das curvas dos histogramas a combinação das bandas 5, 4 e 3 foi a que melhor representou a separabilidade das classes. Observou-se que apesar de haver uma sobreposição nas caudas entre as curvas, seus picos se encontravam localizados em valores distintos de níveis de cinza (NC's). A única exceção ocorre entre as bandas 5 e 4 que apesar de apresentar seus picos em valores distintos, a separabilidade ocorre de forma mais sutil. No processo de classificação foram definidas quatro classes, a saber: agricultura, pastagem, vegetação nativa remanescente e urbano.

O sensor Thematic Mapper (TM) adquire dados de temperatura em seu canal termal e armazena essas informações como números digitais (Digital Numbers – DN's) em intervalos de 0 a 255. Desta forma, é possível converter esses DN's em Kelvin. Inicialmente a Equação 1.4 foi aplicada nas imagens termiais para a conversão dos valores de DN para radiância. Em seguida as imagens calibradas para radiância são submetidas à Equação 1.6 para recuperação da temperatura de brilho. Por sua vez, a Equação 1.7 é utilizada nas imagens com valores de temperatura de brilho a fim de corrigi-las quanto ao valor médio de emissividade (ϵ) dos alvos.

$$Tb = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (1.6)$$

sendo que, Tb é a temperatura de brilho em Kelvin, $K1$ é a primeira constante de calibração para a banda termal cujo valor é de 607,76, $K2$ a segunda constante de calibração com valor de 1260,56 (Chander et al. 2009), e L_λ a banda termal (banda 6) convertida para radiância.

$$Ts = \frac{Tb}{1 + (\lambda \times Tb / \rho) \times \ln \varepsilon} \quad (1.7)$$

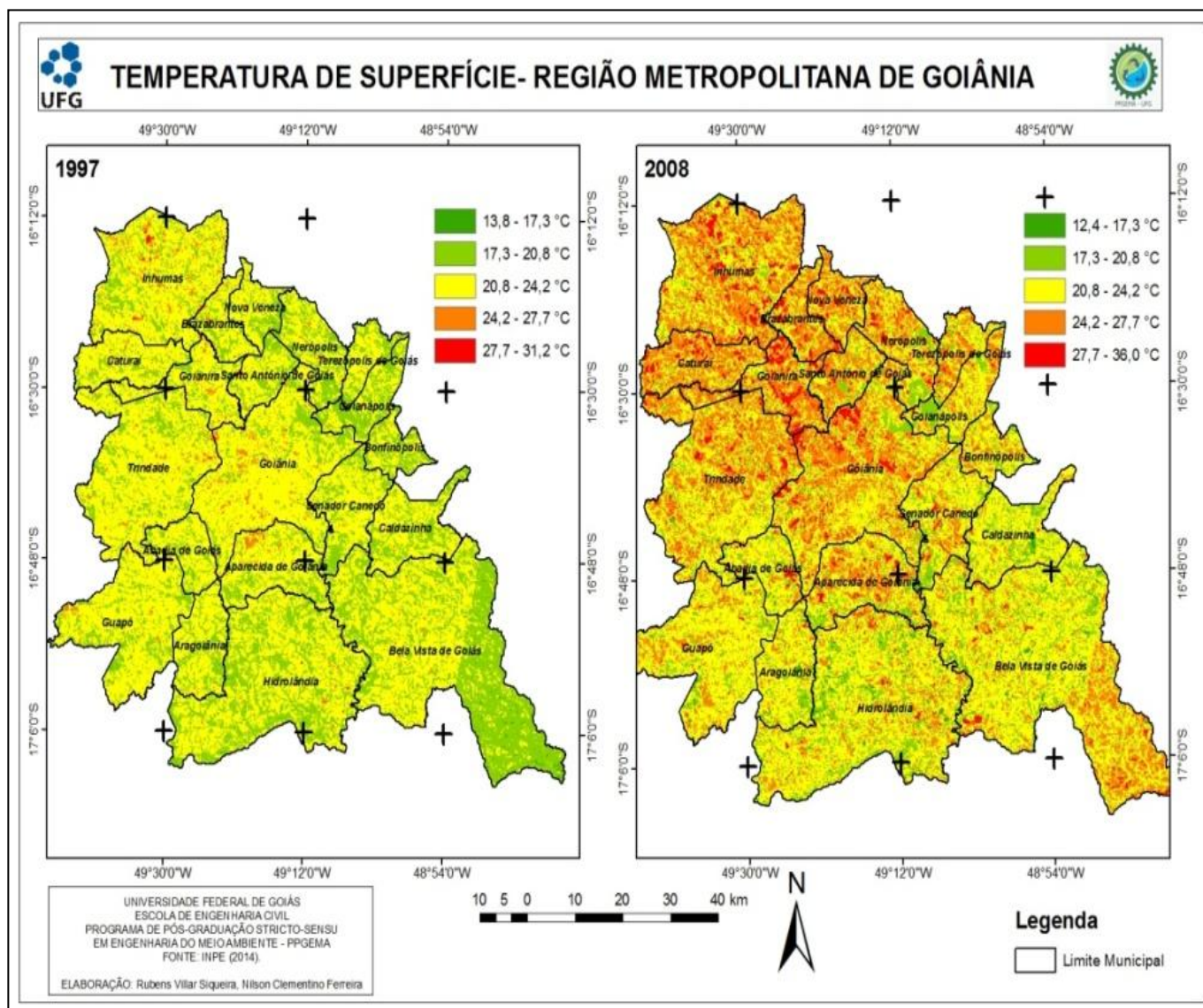
sendo que, Ts é a temperatura de superfície em Kelvin, λ é o comprimento de onda médio da radiação emitida em micrômetros, $\rho = h \times (c/\sigma)$, σ é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), c é a velocidade da luz ($2,998 \times 10^8$ m/s) e ε é a emissividade média dos alvos da superfície no intervalo de 0,0 a 1,0. Os valores de emissividade comumente utilizados estão entre 0,95 ou 0,96, pois são valores que correspondem à emissividade média para os alvos heterogêneos passíveis de serem identificados nas imagens (Lillesand et al. 2004). Neste trabalho o valor adotado para a emissividade foi de 0,96. Finalmente, foram obtidos os valores de temperatura em graus Celsius por meio da Equação 1.8 (Leite & Brito, 2012).

$$T^{\circ}C = T - 273,15 \quad (1.8)$$

2.3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de temperatura de superfície é apresentado na Figura 8, que representa a temperatura superficial da Região Metropolitana de Goiânia para os anos de 1997 e 2008, respectivamente.

Figura 8 - Temperatura de Superfície para os anos de 1997 e 2008.

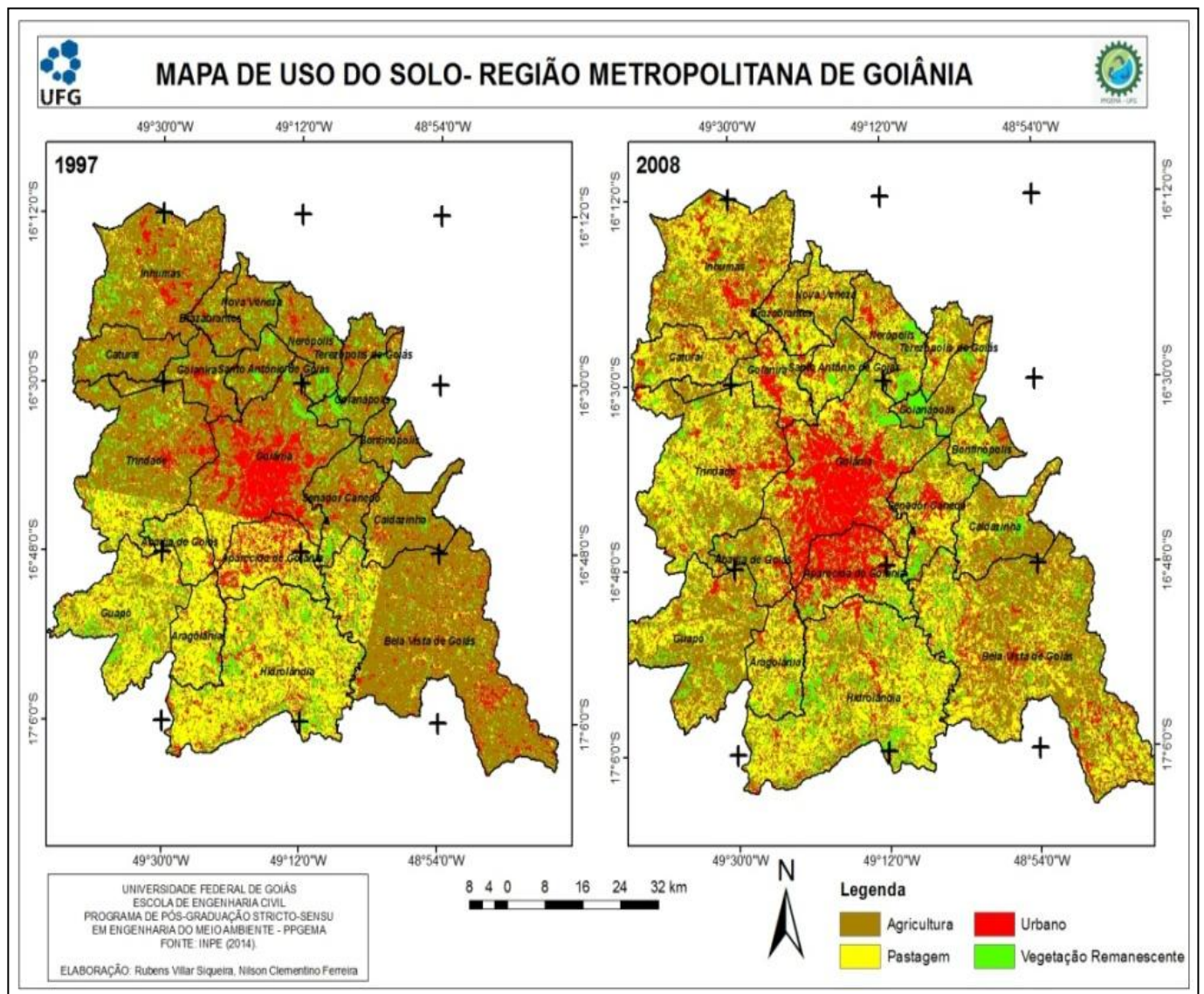


Fonte: O autor.

Analisando o mapa de temperatura de superfície do ano de 1997 é possível notar que a temperatura mínima foi de aproximadamente 13,8 °C. Para o ano de 2008, pode-se notar uma alteração na temperatura mínima registrada, que foi de aproximadamente 12,4 °C para a mesma região. Entre os dois anos estudados nota-se no

mapa um decréscimo de 1,4 °C nos registros de temperaturas mínimas. As temperaturas máximas registraram considerável alteração para os dois anos, com valores de 31,2 °C e 36,0 °C para os anos de 1997 e 2008 respectivamente. Neste caso, houve um acréscimo de 4,8 °C nos registros de temperaturas máximas. Devido à influência do albedo na composição da temperatura de superfície, o mapa de uso do solo, Figura 9, foi elaborado visando analisar e verificar a distribuição espacial da temperatura com a informação espacial urbana, relacionada com o uso do solo.

Figura 9 - Mapa de uso do solo para os anos de 1997 e 2008.



Fonte: O autor.

A análise do mapa da Figura 9 traz a nítida expansão das áreas urbanizadas, entre os dois anos, representadas pela classe “Urbano” nos dois mapas. A Tabela 6 e a

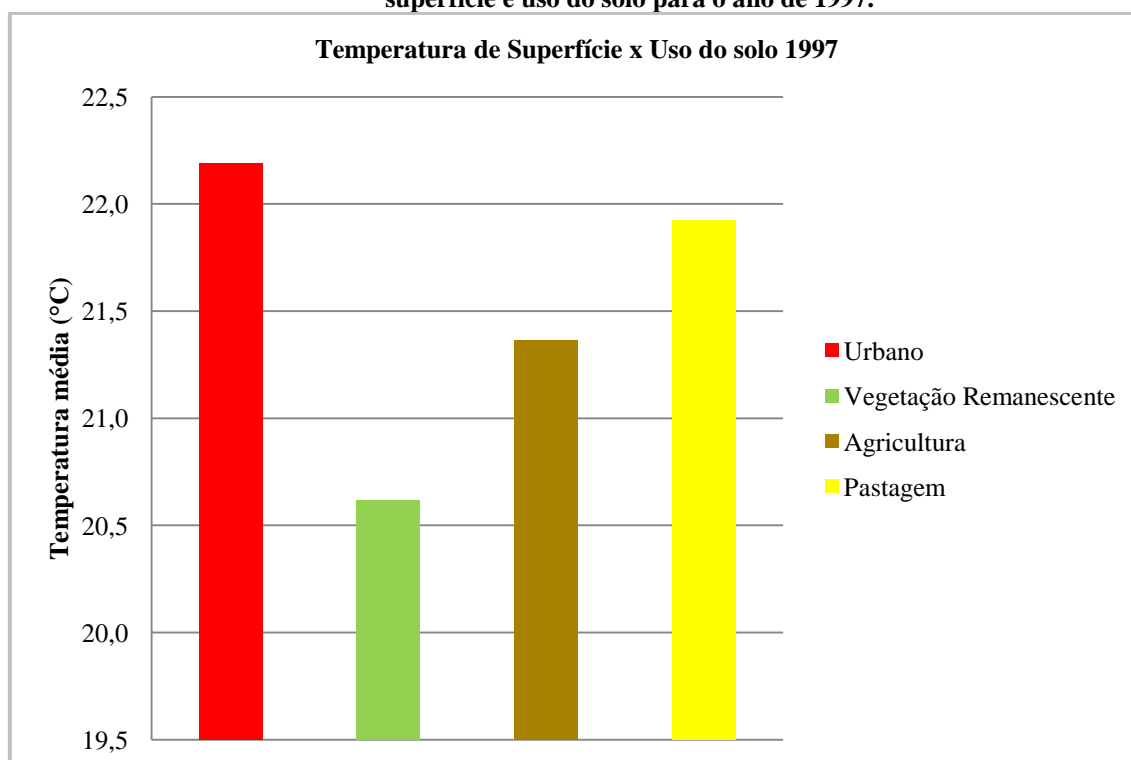
Figura 10 apresentam os resultados obtidos por meio da análise estatística entre os mapas de temperatura e uso do solo para o ano de 1997.

Tabela 6 - Análise estatística entre uso do solo e temperatura em 1997.

Uso do solo	Área (ha)	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)
Urbano	49700	13,8	31,2	22,2
Vegetação Remanescente	121258	15,6	30,4	20,6
Agricultura	395991	15,6	30,4	21,4
Pastagem	163646	16,6	31,2	21,9

Fonte: O autor.

Figura 10 - Demonstrativo das temperaturas médias de superfície e uso do solo para o ano de 1997.



Fonte: O autor.

Nota-se que a temperatura máxima, no valor de 31,2 °C, encontrada no mapa de 1997 corresponde as classes “Urbano” e “Pastagem” que apresentam uma área de 49.700 hectares e 163.646 hectares, respectivamente. A segunda maior temperatura, no valor de 30,4 °C está associada às classes “Agricultura” e “Vegetação Remanescente”, apresentando áreas de 395.991 hectares e 121.258 hectares, respectivamente. No entanto, a Tabela 6 mostra que o menor valor de temperatura mínima, 13,8 °C, esta associada à classe “Urbano”, uma variação de temperatura de 17,4 °C, para esta classe.

A Figura 10 demonstra que as maiores médias de temperatura estão associadas a classe “Urbano” seguida de “Pastagem”, “Agricultura” e “Vegetação Remanescente”. Uma análise estatística semelhante foi elaborada entre os mapas de temperatura e uso do solo para o ano de 2008 e é apresentada na Tabela 7 e na Figura 11.

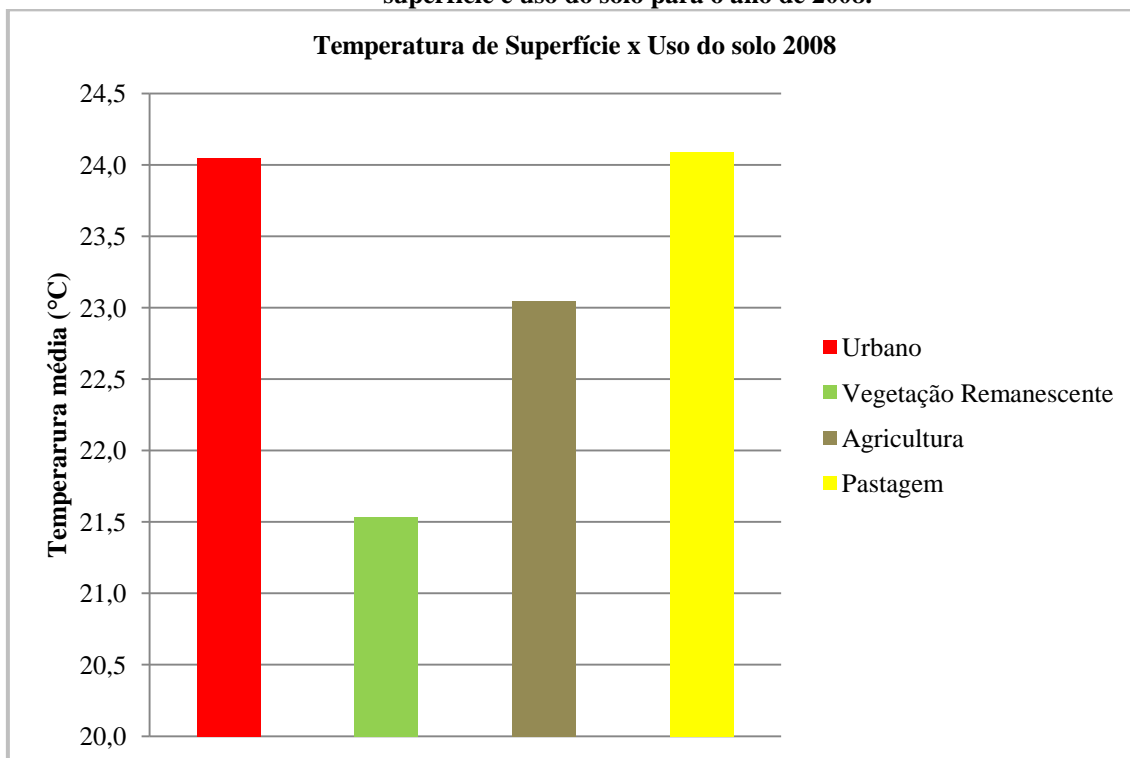
Tabela 7 - Análise estatística entre uso do solo e temperatura em 2008.

Uso do solo	Área (ha)	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)
Urbano	138417,0	12,8	36,0	24,0
Vegetação Remanescente	105139	12,8	33,7	21,5
Agricultura	235872	12,4	35,3	23,0
Pastagem	250744	12,8	35,7	24,1

Fonte: O autor.

Comparando as duas Tabelas anteriores, é possível notar o aumento significativo das áreas em hectares da classe “Urbano”, que apresenta em 2008 o valor de 138.417 hectares, representando um aumento de 88.717 hectares no decorrer de onze anos. As áreas vegetadas, representadas pela classe “Vegetação Remanescente” apresentam uma acentuada redução em seus valores em hectares, 121.258 hectares em 1997 e 105.139 hectares em 2008. Em contrapartida, é possível notar significativo aumento das áreas em hectares da classe “Pastagem”, apresentando 163.646 hectares em 1997 e saltando para 250.744 hectares em 2008, um aumento de 87.098 hectares.

Figura 11 - Demonstrativo das temperaturas médias de superfície e uso do solo para o ano de 2008.



Fonte: O Autor.

A Figura 11 demonstra que a temperatura média da classe “Pastagem” superou da temperatura média da classe “Urbano”. A análise comparativa entre os dados quantitativos, juntamente com os mapas de temperatura de superfície e de uso do solo, demonstram que as temperaturas mais elevadas foram registradas em locais de urbanização e pastagem.

Fazendo a diferenças entre as temperaturas médias para os dois anos, 1997 e 2008, verifica-se um aumento de 2,2 °C para a classe “Pastagem” e de 1,8 °C para a classe urbanizada. As áreas vegetadas (Vegetação Remanescente) tiveram uma alteração na temperatura média de aproximadamente 0,9 °C se mantendo praticamente estável.

2.4 - CONCLUSÕES

Comparando as Tabelas 6 e 7, é possível concluir que existe uma significativa redução da vegetação, representada pela classe “Vegetação Remanescente”. Grande parte dessa alteração pode estar relacionada com a construção de novos bairros, corroborado pelo aumento das áreas urbanas, e também, pela substituição destas áreas vegetadas por áreas de pastagens. A alteração nos valores de temperaturas médias, mínimas e máximas, pode ser atribuído as transformações locais ocasionadas pela

ocupação do solo ao longo dos dois períodos estudados. A substituição de áreas com vegetação por materiais impermeabilizantes, como concretos e asfaltos e com maior capacidade térmica auxiliam no aumento das temperaturas médias, principalmente ao longo de classes que apresentam valores consideráveis de emissividade, como a pastagem e as áreas urbanizadas.

Para complementar este trabalho torna-se necessário realizar a validação dos valores de temperatura estimados com dados observados de estações meteorológicas da área de estudo. Esta validação será realizada no próximo capítulo para que seja escolhido o modelo de recuperação de temperatura de superfície mais adequado e que mais se aproxime dos valores de campo. No entanto, os resultados demonstram clareza na identificação e espacialização das variações de temperatura, bem como nas variações do uso do solo para os dois períodos estudados.

CAPITULO 3. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E SUAS RELAÇÕES COM O MEIO FÍSICO.

3.1 – INTRODUÇÃO

Mudanças na cobertura e uso do solo ocasionam, frequentemente, alterações significativas em diversos elementos do meio geográfico. Dentre esses elementos, a temperatura tem ganhado espaço significativo em artigos e publicações acadêmicas. De fato, devido à emissividade dos alvos da superfície as alterações na cobertura do solo podem trazer consequências severas na variação da temperatura de superfície, resultando em áreas urbanas ou regiões metropolitanas, nas conhecidas ilhas de calor urbano. Estudos recentes (FARIAS, 2012), verificaram que regiões densamente urbanizadas apresentaram condições favoráveis ao estresse térmico e hídrico. Esses efeitos podem ocasionar desconforto térmico e em alguns casos, perigos à saúde da população com idades menores que 2 anos e maiores que 65 anos, que apresentam maior sensibilidade relacionada a regulação térmica. De acordo com (ADUAH, MANTEI & TAGOE, 2012), os efeitos das ilhas de calor são fenômenos climáticos que devem ser estudados, pois influenciam as temperaturas locais e os microclimas alterando os processos de retenção de umidade, crescimento vegetacional e os níveis de evapotranspiração atmosférica.

O estudo temporal da temperatura de superfície e, conseqüentemente, das ilhas de calor urbano torna-se necessário para avaliar a dinâmica da temperatura do ar, sua correlação com a cobertura e uso do solo e seus impactos sociais e econômicos. No decorrer de várias décadas surgiram dispositivos que podem medir a temperatura do ar com precisão confiável, dentre os quais se destacam os sensores remotos orbitais. Sendo assim, devido ao ambiente urbano ser espectralmente complexo, não-homogêneo e extremamente dinâmico, as medidas de temperatura por meio de representações pontuais podem não ser suficientemente abrangentes. Portanto, medidas espacialmente distribuídas podem se apresentar como uma abordagem mais confiável para fornecer a cobertura espacial da temperatura de superfície e o monitoramento das ilhas de calor urbanas. Os efeitos agregados destas ilhas de calor sobre o clima regional ou global, podem ser melhor compreendidos por meio de dados do infravermelho termal adquiridos de sensores, como os instalados a bordo dos satélites da série Landsat. Esses

dados podem ser utilizados para modelar o efeito do aumento da temperatura em áreas urbanas e quantificar as contribuições dos diferentes materiais no efeito térmico.

3.2 - MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 – PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS

As imagens utilizadas foram obtidas por sensores instalados em três plataformas sendo elas: imagens do sensor Thematic Mapper (TM), instalado na plataforma Landsat-5, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), instalado no satélite Landsat-7 e Operacional Terra Imager (OLI), instalado a bordo do Landsat-8, bem como o Thermal Infrared Sensor (TIRS) do mesmo satélite. Para as imagens OLI foram utilizadas as bandas pancromáticas, com 15 metros de resolução espacial, a fim de melhorar a qualidade espacial das imagens que foram utilizadas no processo de classificação. Como o presente estudo trata da análise temporal em intervalos de quatro anos, as datas das imagens adquiridas e suas características técnicas são apresentadas na Tabela 8. A área de estudo abrange quatro órbitas/pontos das imagens sendo: 221/71, 221/72, 222/71 e 222/72. Sendo assim, para os anos de 1997, 2001, 2005 e 2009 obteve-se quatro imagens para cada órbita/ponto, totalizando 64 imagens e para o ano de 2014, cinco imagens para cada órbita/ponto em um total de 20 imagens.

Tabela 8 - Características técnicas das imagens Landsat.

Sensor/Banda	Plataforma	Resolução espacial (m)	Comprimento de onda (μm)	Data das imagens (ano)
TM 3	Landsat-5	30	0,60 - 0,69	1997, 2005 e 2009
TM 4		30	0,77 - 0,90	1997, 2005 e 2009
TM 5		30	1,55 - 1,75	1997, 2005 e 2009
TM 6		120	10,4 - 12,5	1997, 2005 e 2009
ETM+ 3	Landsat-7	30	0,63 - 0,69	2001
ETM+ 4		30	0,76 - 0,90	2001
ETM+ 5		30	1,55 - 1,75	2001
ETM+ 6		60	10,4 - 12,5	2001
OLI 4	Landsat-8	30	0,53 - 0,59	2014
OLI 5		30	0,64 - 0,67	2014
OLI 6		30	0,85 - 0,88	2014
OLI 8		30	2,11 - 2,29	2014
TIRS 10		15	0,50 - 0,68	2014

Fonte: O autor.

As imagens tiveram seus números digitais convertidos para radiância no topo da atmosfera utilizando a Equação 1.9 que deve ser aplicada a cada uma das bandas (Chander et al, 2009). De acordo com os autores, os processos descritos a seguir tratam-se de uma calibração radiométrica tendo em vista que a resposta do detector é comparada com a resposta de uma fonte externa calibrada. Antes do lançamento da plataforma a resposta radiométrica efetiva para cada faixa refletiva é determinada em laboratório e utilizada como referência na calibração.

$$L\lambda = \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN\lambda \quad (1.9)$$

sendo, $L\lambda$ é a radiância espectral do sensor, $LMAX$ e $LMIN$ as constantes de calibração para cada sensor (Chander et al, 2009), $Qcalmax$ é o máximo nível de cinza da imagem a ser calibrado, normalmente 255 para imagens Landsat (TM ou ETM+) e $Qcalmin$ corresponde ao mínimo nível de cinza a ser calibrado, normalmente 0 ou 1 para imagens Landsat (TM ou ETM+).

A próxima etapa tratou da aplicação da Equação 1.10 nas imagens resultantes, para converter as imagens para reflectância no topo da atmosfera. O objetivo foi reduzir a variabilidade oriunda das imagens originais convertendo as imagens transformadas em radiância espectral no topo da atmosfera (Equação 1.9), também conhecido como albedo planetário. Desta forma, quando comparamos imagens de diferentes sensores e diferentes épocas, existem três vantagens em se utilizar a reflectância no topo da atmosfera. A primeira é a eliminação do efeito do cosseno dos diferentes ângulos zenitais solares, devido a diferença de horário entre as aquisições dos dados. Em segundo lugar a reflectância compensa diferentes valores de irradiância solar exo-atmosférica decorrentes das diferenças das bandas espectrais. Finalmente, a reflectância corrige a variação da distância Terra-Sol entre diferentes datas de aquisição de dados. Essas variações podem ser significativas geograficamente e temporalmente (Chander et al, 2009).

$$\rho\lambda = \frac{\pi \cdot L\lambda \cdot d^2}{ESUN\lambda \cdot \cos\theta_s} \quad (1.10)$$

sendo, $\rho\lambda$ é a reflectância no topo da atmosfera do sensor (adimensional), π constante matemática ~ 3.14159 (adimensional), $L\lambda$ radiância espectral resultante da Equação 3.1 [$W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$], d distância Terra-Sol (unidades astronômicas), $ESUN\lambda$ irradiância solar exo-atmosférica média [$W / (m^2 \mu m)$] e θ_s ângulo zenital solar (graus). Os

parâmetros d , $ESUN_{\lambda}$ são Tabelados e o parâmetro θ_s é fornecido pelos arquivos de metadados das imagens. A Equação 1.10 é aplicada somente as imagens multiespectrais (bandas 1, 2, 3, 4 5 e 7), não sendo aplicável a banda 6 ou banda termal.

As imagens ETM+ contam com duas bandas termais, uma de baixo ganho (conhecida como Banda 6 L; usualmente com temperatura entre 130 K a 350 K) e outra de alto ganho (conhecida como Banda 6 H; com temperaturas entre 240 K a 320 K) Chander, Markhan & Helder (2009). No presente trabalho foi utilizada a imagem de baixo ganho.

3.2.2 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

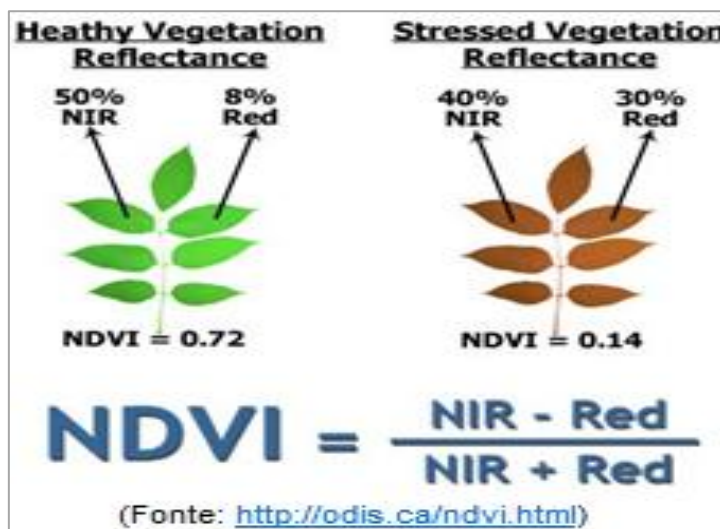
Devido ao fato da temperatura responder rapidamente as mudanças da cobertura da terra (Arantes et al, 2013), principalmente aquelas relacionadas com a vegetação primária, pois exerce expressiva influência na regulação termal da superfície devido ao processo de evapotranspiração (Arantes et al, 2013), este item trata da estimativa dos índices de vegetação consagrados em estudos por Sensoriamento Remoto a fim de avaliar sua dinâmica e suas mudanças no intervalo de tempo estudado neste trabalho, bem como sua relação com a temperatura de superfície. Os índices apresentados e estudados neste trabalho são os mesmos índices de vegetação utilizados no modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) Bastiaanssen et al, 1998. O SEBAL é, como o próprio nome define, um algoritmo que foi desenvolvido para ser aplicado nas imagens do satélite da série Landsat com o objetivo de estimar a evapotranspiração na superfície. Esse algoritmo foi utilizado por diversos autores (Sun et al, 2011; Ideião, 2009; Allen et al, 2011; Gibson, Jarman & Eckardt, 2013; Jia et al, 2013) sendo validado em diversos ambientes e apresentando resultados com elevada precisão.

As imagens de índices de vegetação (IV's) se baseiam no fato da vegetação apresentar uma resposta característica nas regiões do espectro eletromagnético relativas ao vermelho e ao infravermelho próximo, sendo possível diferenciar a vegetação de outros alvos na imagem. Matematicamente, os índices são razões de bandas, obtendo-se como resultado uma nova imagem (Sousa & Ponzoni, 1996).

Os IV's trabalham, em sua grande maioria, nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo, pois de acordo com Baret et al, (1989), estas duas bandas

contém mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação (Figura 12).

Figura 12 - Interação vegetação - NDVI.



Fonte: <http://odis.ca/ndvi.html>

Desta forma, Rouse et al, (1974) propuseram o IV denominado de “Normalized Difference Vegetation Index”, comumente conhecido como NDVI, definido pela Equação 1.11 abaixo.

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1.11)$$

sendo, *IVP* é a imagem na banda infravermelho próximo e *V* é a imagem na banda do vermelho.

O SAVI “Soil Adjusted Vegetation Index” é derivado do NDVI, fazendo um deslocamento da origem do par ordenado *V* e *IVP* para o ponto de encontro da linha do solo com a linha de vegetação, pela adição de uma constante *L* (Epiphanyo et al, 1996), o qual é definido pela Equação 1.12.

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)} (1 + L) \quad (1.12)$$

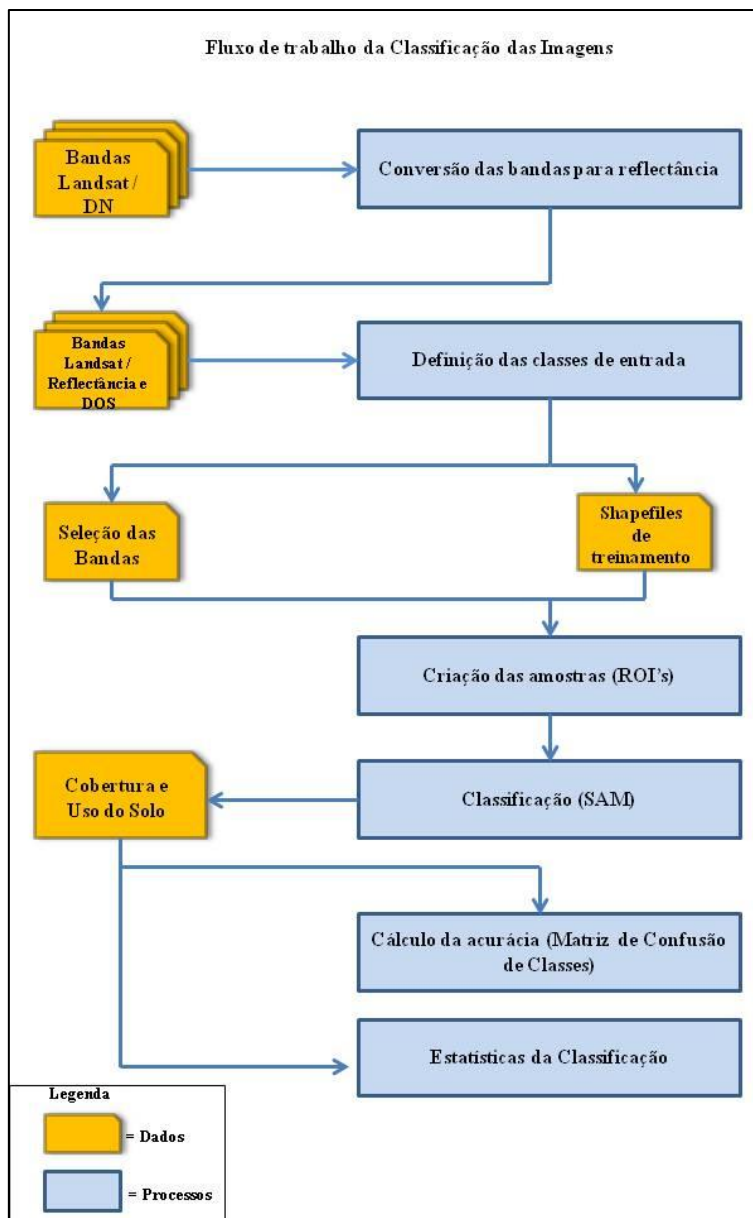
O Índice de Área Foliar (IAF) pode ser utilizado, dentre suas diversas aplicações, na estimativa da evapotranspiração e das emissões biogênicas (González-Sanpedro et al, 2008). Trata-se da razão da área total de todas as folhas de uma planta para a área do solo representado pela planta. É um indicador da biomassa e resistência à copa definido pela Equação 1.13 (Bastiaanssen et al, 2002).

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (1.13)$$

3.2.3 – COBERTURA E USO DO SOLO

A cobertura e uso do solo para os cinco anos distintos foi elaborada por meio do processamento digital de imagens multiespectrais Landsat-5/TM, Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI. O mapeamento da cobertura e uso do solo foi realizado por meio de classificação supervisionada utilizando o método Spectral Angle Mapper (SAM). Esse algoritmo é um processo de classificação espectral que utiliza ângulos no espaço multidimensional n-D coincidindo-os com os espectros dos pixels de referência. O algoritmo determina a semelhança espectral entre os dois espectros, calculando o ângulo entre esses espectros e os trata como vetores num espaço com dimensionalidade igual ao número de bandas. Essa técnica, quando utilizada em imagens calibradas para refletância, apresenta-se relativamente insensível aos efeitos de iluminação e albedo. No entanto, esta limitação pode ser corrigida ou minimizada por meio de amostras espectrais que podem ser oriundas de arquivos ASCII, bibliotecas espectrais ou por meio da coleta de amostras dos pixels que representam as classes diretamente da imagem, como utilizado neste trabalho. O SAM compara os ângulos entre os vetores das amostras espectrais e o vetor de cada pixel no espaço multidimensional n-D. O fluxo de trabalho executado é representado pictoricamente pela Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do trabalho de classificação das imagens do estudo.











Fonte: O autor. Adaptado de: <http://fromgisters.blogspot.com/2014/01/land-cover-classification-of-cropland.html>.

A correção atmosférica das imagens convertidas para valores de reflectância é extremamente importante durante a fase de pré-processamento, visando reduzir os efeitos atmosféricos, tais como absorção e espalhamento, que afetam a energia eletromagnética registrada pelo sensor. A correção atmosférica utilizada abordou o método denominado *Dark Object Subtraction 1* (DOS1). O método DOS utiliza técnicas baseadas em imagens para o cálculo de parâmetros atmosféricos, sem a necessidade de medidas *in situ* durante a aquisição das imagens. De acordo com Chavez (1996), o pressuposto básico é que dentro da imagem existem alguns pixels que estão

em áreas de completa sombra, onde seus valores deveriam estar próximos à zero, mesmo assim, os valores de radiância recebidos pelos satélites apresentam valores altos devido à dispersão atmosférica. Convém ressaltar que a precisão das técnicas baseadas em imagens é, geralmente, inferior as correções baseadas em medidas físicas, mas são muito úteis quando não existem medições atmosféricas disponíveis no momento de passagem do satélite, mesmo assim estas medidas melhoram significativamente a estimativa da reflectância de superfície.

As classes foram definidas utilizando como referência as classes encontradas em arquivos cartográficos do Ministério do Meio Ambiente (MMA), disponíveis no endereço eletrônico (<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>), arquivos shapefiles do Sistema Estadual de Geoinformação (SIEG), adquiridos por meio o endereço eletrônico (<http://www.sieg.go.gov.br/>) e recortadas para a área de estudo. Foram definidas oito classes, relacionadas na Tabela 9. As cores de cada classe seguem a padronização sugerida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em seu Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).

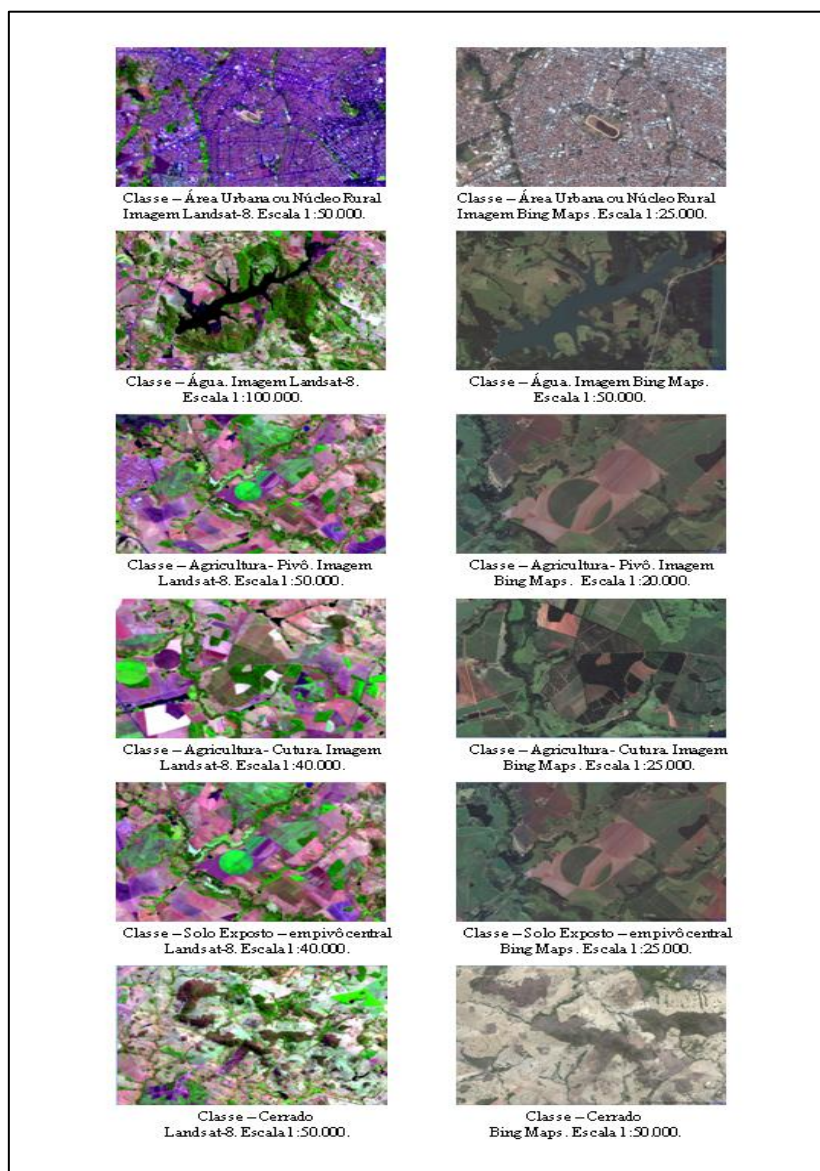
Tabela 9 - Classes definidas da área de estudo.

Classe	Cor	R-G-B
Área Urbana ou Núcleo Rural		255-168 -192
Água		153-194-230
Agricultura - Pivô		255-255-0
Agricultura - Cultura		255-214-0
Solo Exposto		178-178-178
Vegetação Remanescente		115-168-0
Cerrado		214-255-168
Pastagem		205-137-0

Fonte: O autor.

Como o algoritmo de classificação Maxima Verossimilhança integra o grupo de classificação supervisionada torna-se necessário o conhecimento, à priori, da área a fim de selecionar as classes de interesse e fornecer ao algoritmo os padrões espectrais típicos da área de estudo. Para substituir os pontos de amostragem obtidos em campo os alvos na imagem que representam cada classe foram comparados, por meio de suas coordenadas geográficas, com imagens de alta resolução espacial gratuitas disponíveis nos programas computacionais Google Earth, Google Maps e Bing Maps (Figura 14).

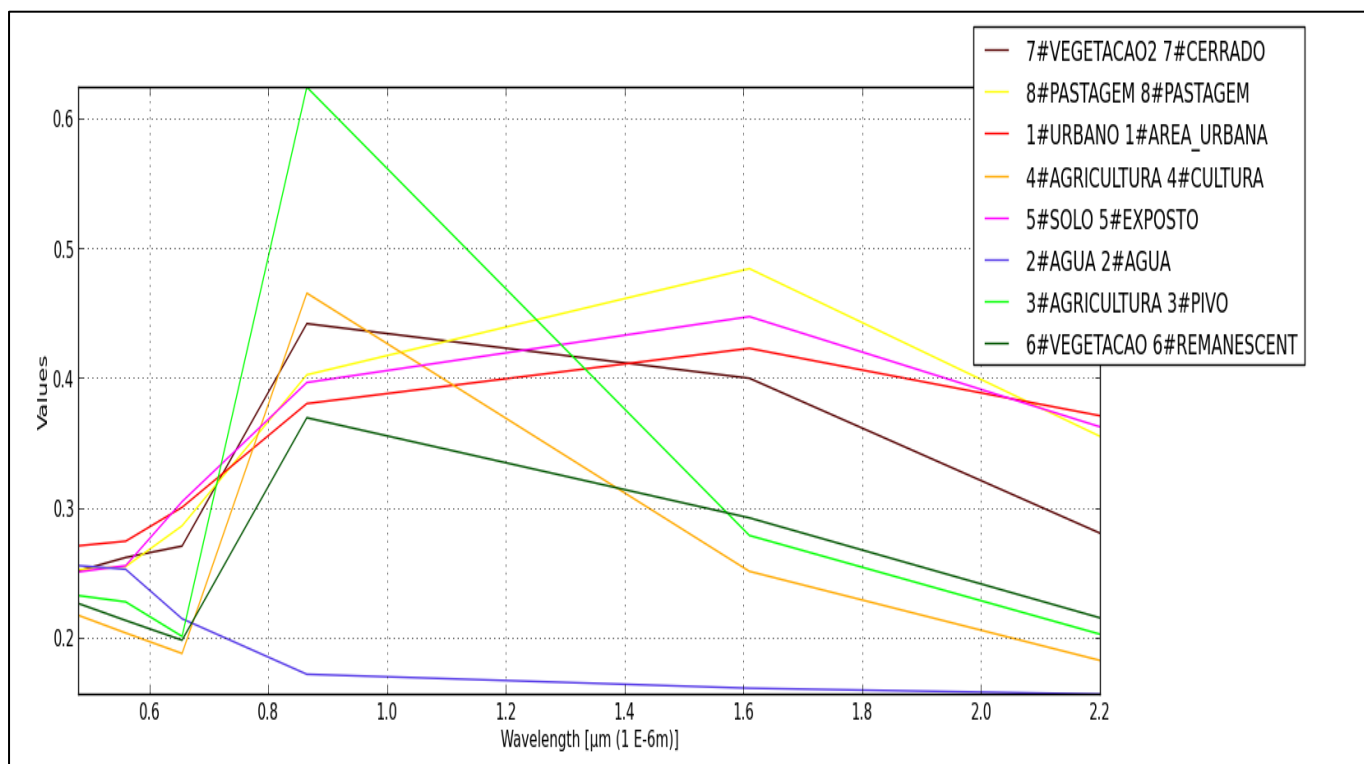
Figura 14- Amostras das classes utilizadas para a classificação.



Fonte: O autor.

Desta forma, após a coleta das amostras, foram gerados gráficos do comportamento espectral de cada classe a fim de avaliar a qualidade das amostras e a separabilidade de cada amostra. Essa etapa é importante, pois por meio do comportamento espectral pode-se avaliar se as amostras da classe “Agricultura – Cultura” não se confundem espectralmente com as amostras da classe “Agricultura – Pivô” ou qualquer outras das seis classes que foram definidas para a área de estudo. O comportamento espectral das amostras das classes é apresentados na Figuras 15.

Figura 15 - Assinaturas espectrais das amostras utilizadas na classificação.



Fonte: O autor.

A Figura 15 mostra as assinaturas espectrais, de todas as oito classes como uma função do comprimento de onda. Pode-se notar, por exemplo, que as classes “Agricultura – Cultura”, representada pela linha na cor laranja e “Agricultura – Pivô”, representada pela linha de cor verde-claro, apresentaram boa separabilidade, pois seus picos espectrais se encontram em posições distintas no gráfico, com o efeito mais acentuado no eixo Y. Raciocínio idêntico pode ser aplicado para todas as outras classes.

3.2.4 – TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

Para estimar a temperatura de superfície foram utilizadas as bandas termiais dos sensores *Landsat-5*, *Landsat-7* e *Landsat-8*, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Características dos sensores termiais.

Sensor	Banda	Resolução espacial (m)
Landsat-5	TM 6	120
Landsat-7	TM 6	60
Landsat-8	TIRS 10	100
	TIRS 11	100

Fonte: O autor.

As imagens apresentadas na Tabela 10 foram convertidas de radiância espectral no topo da atmosfera (Equação 1.9) para temperatura de brilho no sensor. A temperatura de brilho no sensor assume que a Terra se comporta como um corpo negro, com emissividade igual a 1, incluindo efeitos atmosféricos como absorção e outras emissões ao longo do caminho superfície-sensor, sendo estimada pela Equação 1.14.

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (1.14)$$

Sendo, T_B é a temperatura de brilho no sensor ou temperatura radiante (Kelvin), K_1 e K_2 constantes termiais específicas das bandas, L_λ radiância espectral no topo da atmosfera ($W / m^2 \text{ srad } \mu\text{m}$). As constantes K_1 e K_2 , para os sensores *Landsat-5* e *Landsat-7* são Tabeladas e fornecidas por Chander, Markhan & Helder (2009), para o sensor *Landsat-8* são fornecidas no arquivo de metadados das imagens. As constantes utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Constantes termiais para as imagens Landsat.

Sensor	Banda	$K1 - W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$	$K2$ (Kelvin)
Landsat-5	TM 6	607.76	1260.56
Landsat-7	TM 6	666.09	1282.71
Landsat-8	TM10	774,89	1321,08
	TM 11	480,89	1201,14

Fonte: Chander, Markhan & Helder (2009).

Dos vários estudos que abordam o cálculo de temperatura de superfície, alguns

utilizam índices de vegetação, como o NDVI, para estimar a emissividade da superfície, como, por exemplo, o SEBAL, proposto por Bastiaanssen et al, (2002) ou utilizado por Sobrino et al, (2004). No entanto, para este estudo foi utilizada a cobertura e uso do solo, definindo a emissividade da superfície para cada uma das oito classes encontradas na área de estudo.

Geralmente a emissividade é uma função do comprimento de onda e é comumente conhecida como emissividade espectral (Dash et al, 2002). Estimativas de emissividades para alvos em solo a partir de dados de sensores passivos (como o caso da série Landsat) podem ser medidas utilizando várias técnicas. Essas técnicas são o método normalizado da emissividade (Gillespie, 1985), índices espectrais termais (Becker & Li, 1990), método da razão (divisão) espectral (Watson, 1992), método residual Alpha (Kealy & Gabell, 1990), método do NDVI (Valor & Caselles, 1996), estimativa baseada em classificação (Snyder et al, 1998) e o método da separação da temperatura e emissividade (Gillespie et al, 1998).

Considerar a emissividade na estimativa da temperatura torna-se importante, devido ao fato de que o desconhecimento dessa variável pode introduzir um erro que varia entre 0,2 a 1,2 K para regiões tropicais de média latitude e de 0,8 a 1,4 K em condições de inverno para emissividades próxima de 0,98 em solo, quando o método de canal simples (single-channel) é utilizado na estimativa da temperatura de superfície (Weng et al, 2004).

Portanto, para este trabalho foi utilizado o método da estimativa baseada em classificação de imagens. Este método associa para cada classe um valor de emissividade, o qual entra no cálculo da temperatura de superfície, por meio da Equação 1.15.

$$T_s = \frac{T_B}{1 + (\lambda * T_B / \rho) \times \ln \varepsilon} \quad (1.15)$$

Sendo, T_s a temperatura de superfície, T_B é a temperatura de brilho, λ é o comprimento de onda médio da radiação emitida (Tabela 12), $\rho = h \times (c / s) = 1,438 \times 10^{-2}$ (mK), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), s é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), c é a velocidade da luz ($2,998 \times 10^8$ m/s) e ε é a emissividade com valores no intervalo de 0,0 a 1,0.

Tabela 12 - Valores de λ para as bandas termais dos satélites Landsat.

Satélite	Banda	μm (médio)
Landsat 5 e 7	6	11,45
Lansat 8	10	10,8
Lansat 8	11	12

Fonte: Chander, Markhan & Helder (2009).

No caso da Equação 1.15, os valores de ε são os mesmos valores da emissividade de cada classe, em ε deve-se inserir a imagem de cobertura e uso do solo convertida para emissividade. Utilizando como referência a Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de emissividade média para a área de estudo.

Classe	ε
Área Urbana ou Núcleo Rural	0,938
Água	0,95
Agricultura - Pivô	0,975
Agricultura - Cultura	0,91
Solo Exposto	0,9475
Vegetação Remanescente	0,97
Cerrado	0,959
Pastagem	0,95

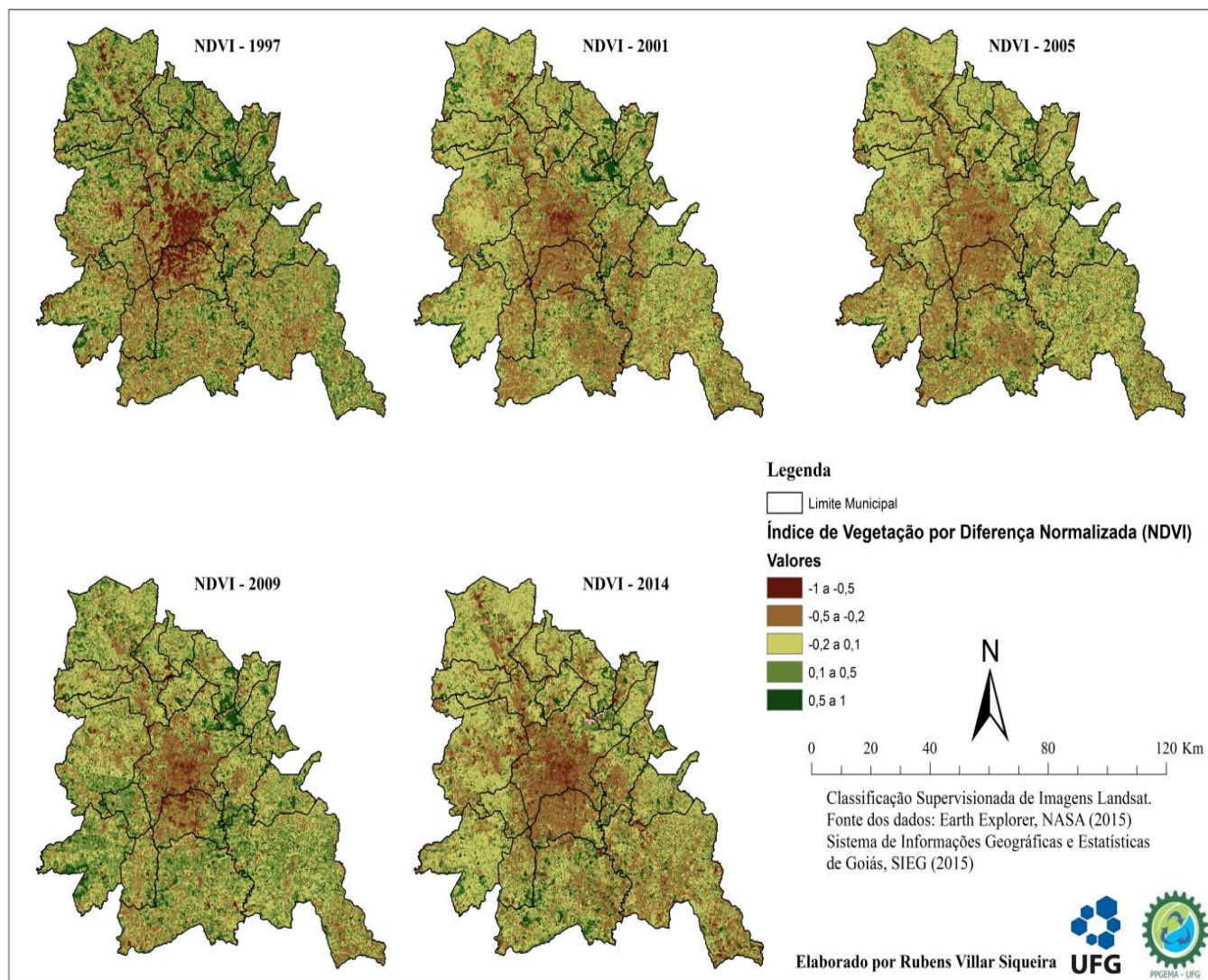
Fonte: O autor. Adaptado de Lillesand, Kiefer & Chipman (2004).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

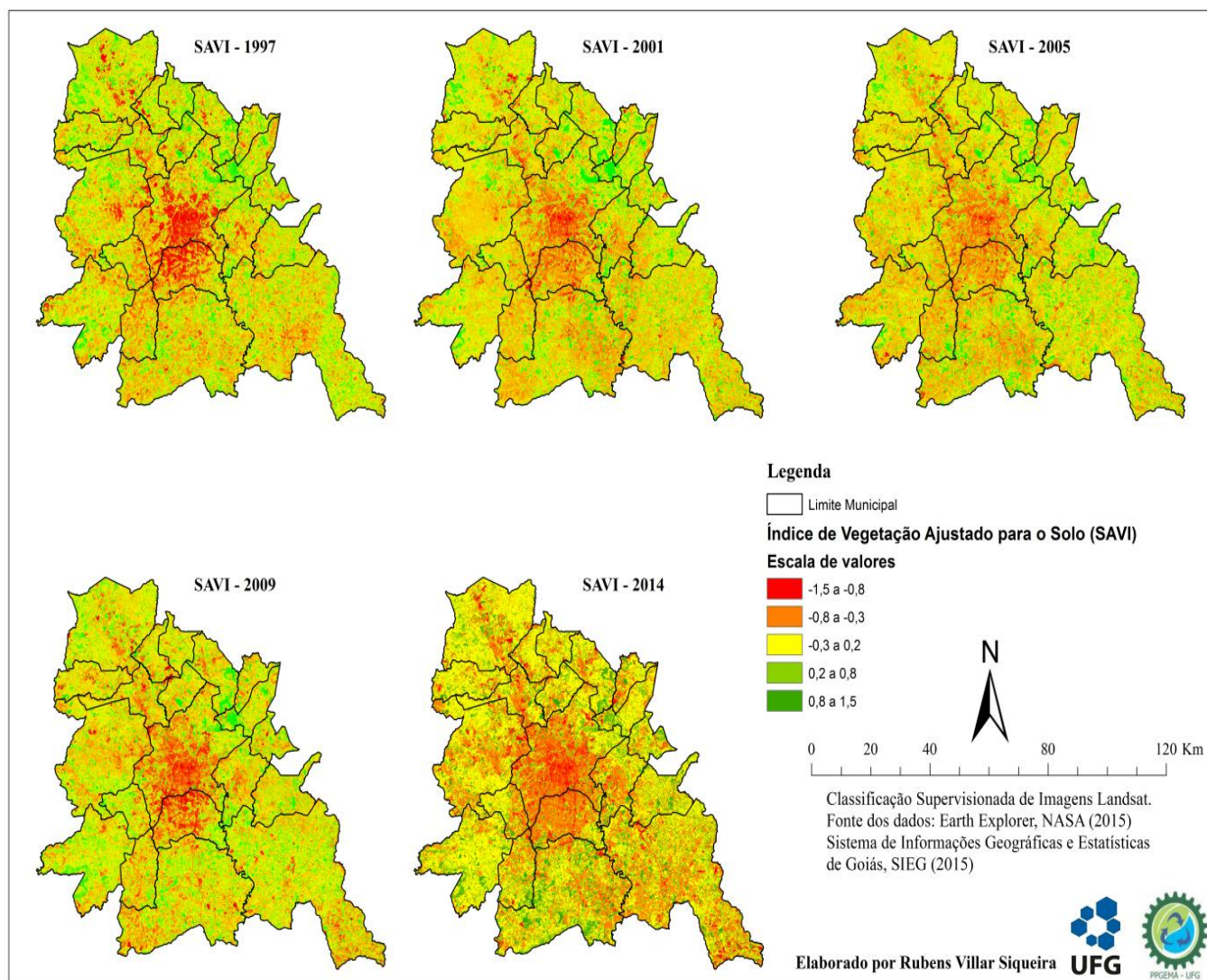
O primeiro índice de vegetação analisado foi o NDVI. Os resultados apresentam valores variando de -1 a 1, de modo que valores próximos a 1 apresentam maior índice de vegetação e valores próximos de -1 apresentam maior índice de presença de solos descobertos e rochas ou outros alvos. O segundo índice foi o SAVI apresentando valores que variaram de -1,5 a 1,5, sendo os valores próximos a 1,5 indicam forte presença de vegetação enquanto valores próximos a -1,5 presença de solos e outros alvos. Raciocínio semelhante ocorre sobre o IAF, último índice analisado, com variação de valores entre -4,0 a 1,5. As Figuras 16 a 18 apresentam, os índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF), respectivamente, bem como sua variação no decorrer dos anos.

Figura 16 - NDVI para a Região Metropolitana de Goiânia.



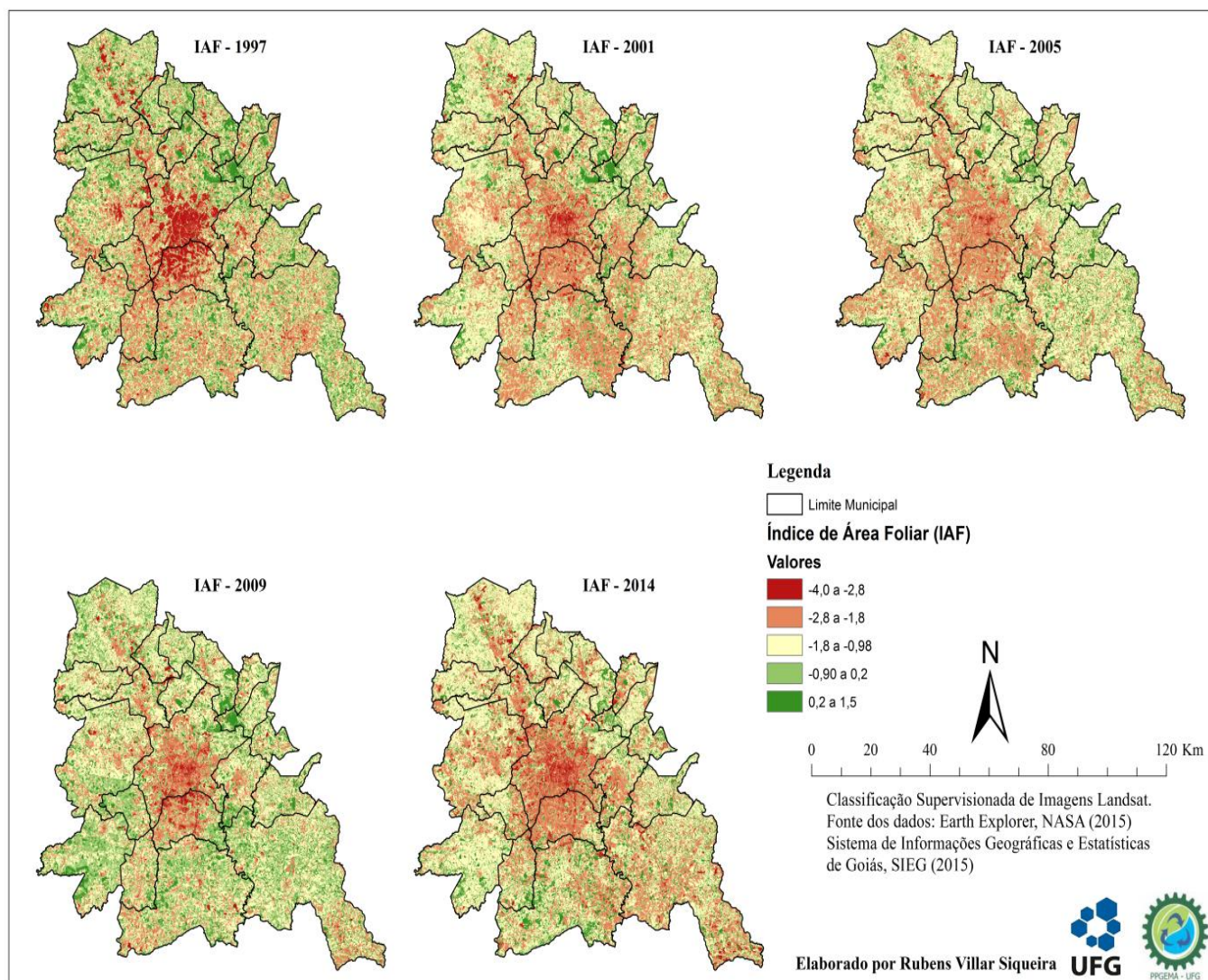
Fonte: O autor.

Figura 17 - SAVI para a Região Metropolitana de Goiânia.



Fonte: O autor.

Figura 18 - IAF para Região Metropolitana de Goiânia.

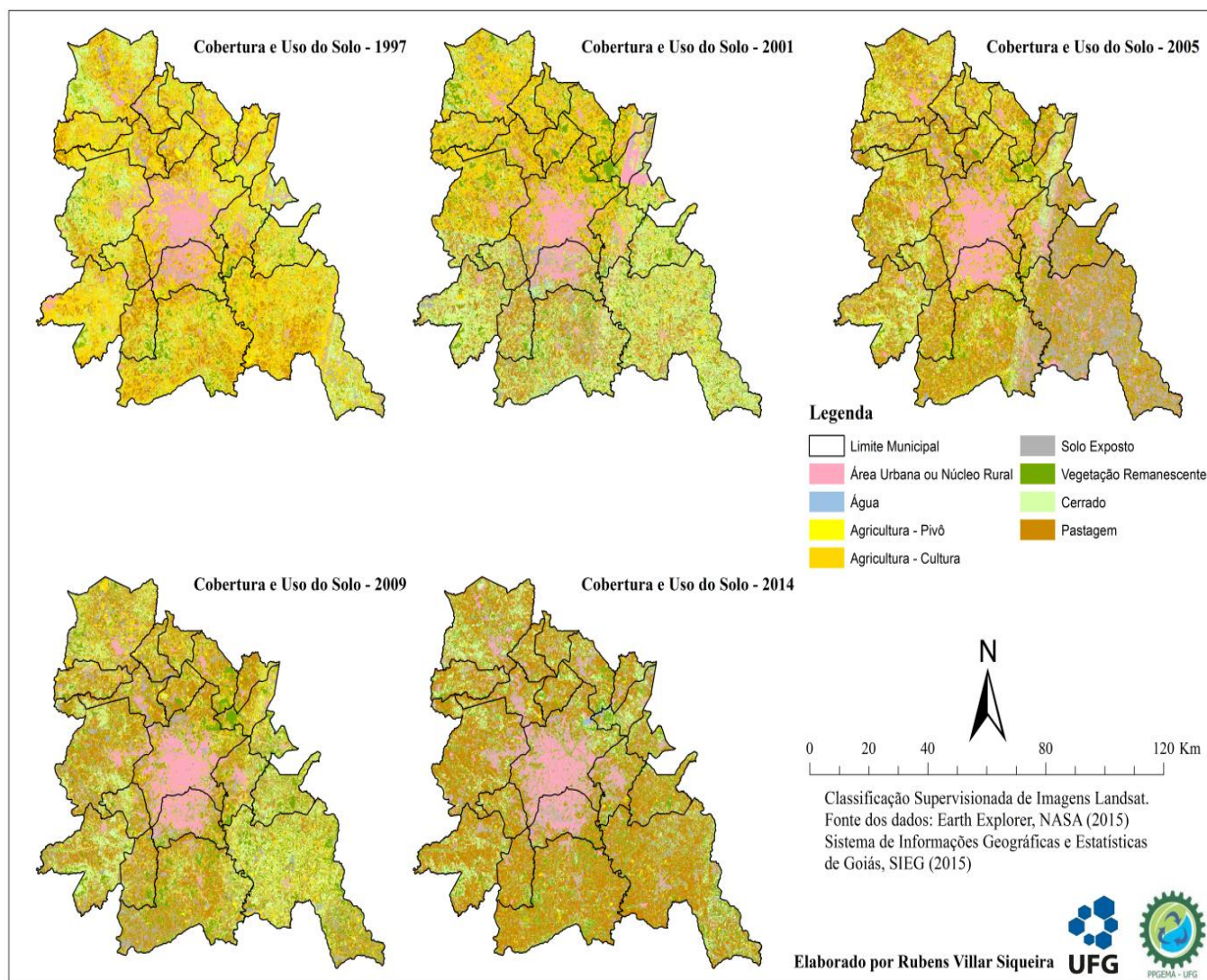


Fonte: O autor.

3.3.2 COBERTURA E USO DO SOLO

O mosaico de mapas com a cobertura e uso do solo para os cinco anos distintos é apresentado na Figura 19, contendo o percentual da cobertura do solo dos vinte municípios integrantes da Região Metropolitana de Goiânia. Uma análise quantitativa foi realizada para cada um dos vinte municípios que integram a área de estudo, sendo apresentada nas Tabelas 14 e 15.

Figura 19 - Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia.



Fonte: O Autor.

Tabela 14 - Áreas médias de Cobertura e Uso do solo para a Região Metropolitana de Goiânia. Valores em hectares.

Classe	Média (ha)				
	1997	2001	2005	2009	2014
Cultura	1,76	1,01	0,76	0,41	0,60
Pivô	0,56	0,23	0,18	0,25	1,36
Cerrado	0,59	1,39	0,59	0,67	0,69
Pastagem	0,24	0,89	1,89	1,40	6,22
Solo Exposto	0,81	0,58	0,78	0,56	0,49
Vegetação	0,59	1,69	1,34	2,42	1,22
Água	0,64	0,83	0,40	0,44	0,74
Urbano	1,30	0,96	1,50	1,67	1,86

Fonte: O autor.

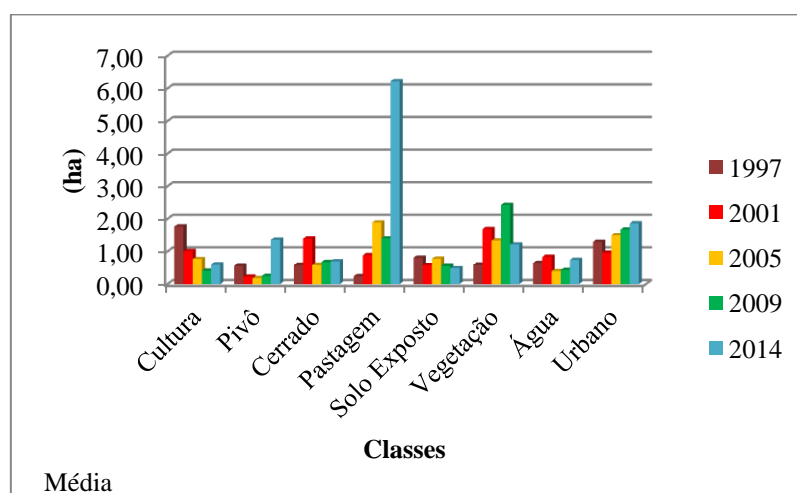
Tabela 15 - Áreas totais de Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia. Valores em hectares.

Classe	Total (ha)				
	1997	2001	2005	2009	2014
Cultura	374362,52	182873,60	145088,34	113486,38	15818,00
Pivô	67491,67	14046,84	12858,21	8947,64	1263,86
Cerrado	138619,49	266439,21	121236,51	167560,71	149924,74
Pastagem	5532,82	143380,83	242761,84	210603,76	330563,22
Solo Exposto	94057,32	37655,50	94190,05	80374,33	56978,41
Vegetação	37165,08	97390,52	67084,22	122687,24	100205,14
Água	59663,99	26444,98	5544,48	1770,74	2847,08
Urbano	73468,24	67296,07	97074,47	84520,82	73695,26

Fonte: O autor.

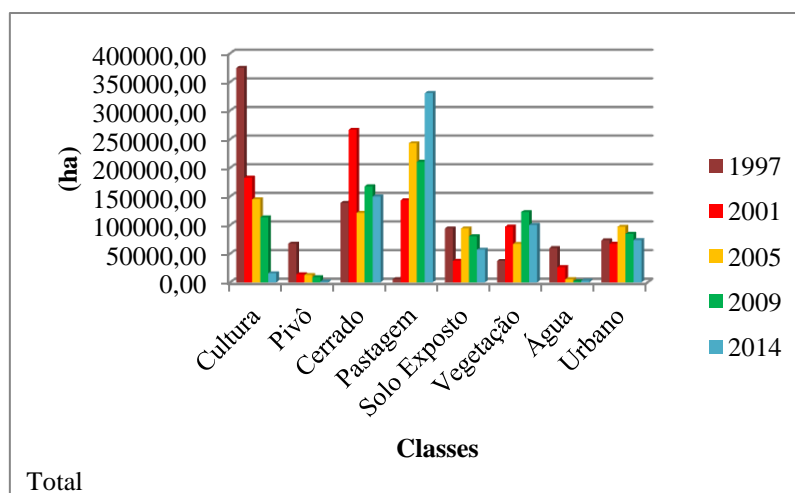
Analisando visualmente o mosaico de mapas da Figura 19 é possível notar o aumento da mancha relacionada à classe “Área urbana ou Núcleo Rural”. Na região noroeste é possível notar um aumento linear da mancha urbana, indicando uma expansão da cidade de Goiânia em direção a Goianira e Inhumas. O mesmo processo ocorre em direção ao município de Trindade, bem como em direção do município de Senador Canedo. O comportamento dos valores quantitativos pode ser melhor visualizado por meio da Figura 20, que correspondem aos totais para os cinco anos estudados.

Figura 20 - Gráfico dos valores de áreas médias de Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia. Fonte:



O autor.

Figura 21 - Gráfico dos valores dos totais de áreas de Cobertura e Uso do Solo para a Região Metropolitana de Goiânia.



Fonte: O autor.

A Figura 21, correspondente às áreas totais, apresenta um aumento da classe pastagem para o ano de 2014. O valor desta classe é de 330.563,22 ha para o ano de 2014. Nota-se, também, um aumento significativo das áreas totais da classe “Cerrado” em 2001 que apresenta áreas totais de 266.439,21 ha e uma redução para 149.924,74 ha para o ano de 2014.

No entanto, torna-se necessário ressaltar que os valores apresentados estão sujeitos a incertezas inerentes ao processo de classificação de imagens. Para quantificar estas incertezas e a qualidade da classificação das imagens deste trabalho, apresenta-se a matriz de classificação, nas Tabelas 16, 17 e 18.

Tabela 16 - Matriz de Classificação da imagem de 1997 e 2001 para Região Metropolitana de Goiânia.

Classes	1997								
	1 - Urbano	2 - Água	3 - Cultura	4 - Pivô	5 - Solo	6 - Vegetação	7 - Cerrado	8 - Pastagem	Tota
1 - Urbano	4506	6	2	1	91	0	0	1	460
2 - Água	11	391	2	3	89	0	0	0	496
3 - Cultura	4	0	3904	67	5	1	285	217	448
4 - Pivô	3	32	193	2770	0	388	1	0	338
5 - Solo	178	1	9	0	816	0	1	8	101
6 - Vegetação	0	0	78	449	0	1140	17	0	168
7 - Cerrado	0	1	427	4	0	0	1372	99	190
8 - Pastagem	11	0	173	0	0	0	1	1045	123
Total =	4713	431	4788	3294	1001	1529	1677	1370	188
Acurácia global (%) = 84,80									
	Classe 1 - Acurácia do Produtor (%)	95,61	Acurácia do Usuário (%)	97,81	Classe 2 - Acurácia do Produtor (%)	90,72	Acurácia do Usuário (%)	78,83	

	Classe 3 - Acurácia do Produtor (%)	81,54	Acurácia do Usuário (%)	87,08	Classe 4 - Acurácia do Produtor (%)	84,09	Acurácia do Usuário (%)	81,78	
	Classe 5 - Acurácia do Produtor (%)	81,52	Acurácia do Usuário (%)	80,55	Classe 6 - Acurácia do Produtor (%)	74,56	Acurácia do Usuário (%)	67,7	
	Classe 7 - Acurácia do Produtor (%)	81,81	Acurácia do Usuário (%)	72,1	Classe 8 - Acurácia do Produtor (%)	76,3	Acurácia do Usuário (%)	84,9	
Classes	2001								
	1 - Urbano	2 - Água	3 - Cultura	4 - Pivô	5 - Solo	6 - Vegetação	7 - Cerrado	8 - Pastagem	Tota 1
1 - Urbano	9710	50	1	8	332	3	10	11	10125
2 - Água	54	3657	162	52	95	204	222	243	4689
3 - Cultura	11	344	3216	0	0	77	5	0	3653
4 - Pivô	39	9	0	1519	2	12	1	0	1582
5 - Solo	484	1	0	4	6633	0	12	222	7356
6 - Vegetação	0	28	46	13	0	8275	17	0	8379
7 - Cerrado	27	247	37	10	0	47	2536	527	3431
8 - Pastagem	110	391	1	0	436	7	282	2501	3728
Total =	10435	4727	3463	1606	7498	8625	3085	3504	42943
Acurácia global (%) = 88,6									
	Classe 1 - Acurácia do Produtor (%)	93,05	Acurácia do Usuário (%)	95,9	Classe 2 - Acurácia do Produtor (%)	77,4	Acurácia do Usuário (%)	78	
	Classe 3 - Acurácia do Produtor (%)	92,9	Acurácia do Usuário (%)	88,4	Classe 4 - Acurácia do Produtor (%)	94,6	Acurácia do Usuário (%)	96,02	
	Classe 5 - Acurácia do Produtor (%)	88,7	Acurácia do Usuário (%)	90,2	Classe 6 - Acurácia do Produtor (%)	95,9	Acurácia do Usuário (%)	98,7	
	Classe 7 - Acurácia do Produtor (%)	82,2	Acurácia do Usuário (%)	73,9	Classe 8 - Acurácia do Produtor (%)	71,4	Acurácia do Usuário (%)	67,09	

Fonte: O autor.

Tabela 17-Matriz de Classificação da imagem de 2005 e 2009 para Região Metropolitana de Goiânia.

Classes	2005								
	1 - Urbano	2 - Água	3 - Cultura	4 - Pivô	5 - Solo	6 - Vegetação	7 - Cerrado	8 - Pastagem	Total
1 - Urbano	12827	3	0	178	198	0	5	3	13214
2 - Água	44	1052	5	0	0	0	0	0	1101
3 - Cultura	8	5	3322	154	0	26	1	0	3516
4 - Pivô	162	25	68	3166	59	38	194	1	3713
5 - Solo	776	0	0	189	2150	0	71	35	3221
6 - Vegetação	1	7	96	198	0	2433	0	0	2735
7 - Cerrado	28	8	2	742	4	0	1253	53	2090
8 - Pastagem	288	0	0	103	13	0	302	1189	1895
Total =	14134	1100	3493	4730	2424	2497	1826	1281	31485

Acurácia global (%) = 87,0

	Classe 1 - Acurácia do Produtor (%)	90,7	Acurácia do Usuário (%)	97,07	Classe 2 - Acurácia do Produtor (%)	95,64	Acurácia do Usuário (%)	95,55	
	Classe 3 - Acurácia do Produtor (%)	95,1	Acurácia do Usuário (%)	94,5	Classe 4 - Acurácia do Produtor (%)	66,93	Acurácia do Usuário (%)	85,27	
	Classe 5 - Acurácia do Produtor (%)	88,7	Acurácia do Usuário (%)	66,75	Classe 6 - Acurácia do Produtor (%)	97,4	Acurácia do Usuário (%)	88,96	
	Classe 7 - Acurácia do Produtor (%)	68,62	Acurácia do Usuário (%)	59,95	Classe 8 - Acurácia do Produtor (%)	92,82	Acurácia do Usuário (%)	62,74	

Classes	2009								
	1 - Urbano	2 - Água	3 - Cultura	4 - Pivô	5 - Solo	6 - Vegetação	7 - Cerrado	8 - Pastagem	Total
1 - Urbano	10263	0	58	0	257	0	0	0	10580
2 - Água	0	269	0	0	0	0	0	0	269
3 - Cultura	6	0	7076	244	5	74	139	19	7563
4 - Pivô	0	0	458	5172	2	13	1	0	5646
5 - Solo	360	0	13	0	6161	0	26	93	6653
6 - Vegetação	0	1	72	44	0	3011	11	0	3139
7 - Cerrado	12	0	568	3	66	18	2464	206	3337
8 - Pastagem	6	0	78	0	864	0	225	2193	3366
Total =	10647	270	8323	5463	7355	3116	2868	2511	40553

Acurácia global (%) = 87,0

	Classe 1 - Acurácia do Produtor (%)	96,4	Acurácia do Usuário (%)	97	Classe 2 - Acurácia do Produtor (%)	99,63	Acurácia do Usuário (%)	100	
--	---	------	----------------------------------	----	--	-------	----------------------------------	-----	--

	Classe 3 - Acurácia do Produtor (%)	85,02	Acurácia do Usuário (%)	93,56	Classe 4 - Acurácia do Produtor (%)	94,7	Acurácia do Usuário (%)	91,6	
	Classe 5 - Acurácia do Produtor (%)	83,8	Acurácia do Usuário (%)	92,6	Classe 6 - Acurácia do Produtor (%)	96,6	Acurácia do Usuário (%)	95,92	
	Classe 7 - Acurácia do Produtor (%)	85,91	Acurácia do Usuário (%)	73,84	Classe 8 - Acurácia do Produtor (%)	87,33	Acurácia do Usuário (%)	65,15	

Fonte: O autor.

**Tabela 18 - Matriz de Classificação da imagem de 2014 para
Região Metropolitana de Goiânia.**

Classes	2014								Total
	1 - Urbano	2 - Água	3 - Cultura	4 - Pivô	5 - Solo	6 - Vegetação	7 - Cerrado	8 - Pastagem	
1 - Urbano	1532	0	0	0	3	4	0	3	1542
2 - Água	0	57	0	0	0	0	0	0	57
3 - Cultura	0	0	512	0	0	0	0	0	512
4 - Pivô	0	0	0	118	0	0	0	0	118
5 - Solo	0	0	0	0	387	0	0	5	392
6 - Vegetação	0	0	0	0	0	1151	8	0	1159
7 - Cerrado	0	0	0	0	0	16	284	0	300
8 - Pastagem	0	0	0	0	0	0	0	658	658
Total =	1532	57	512	118	390	1171	292	666	4738

Acurácia global (%) = 99,18

	Classe 1 - Acurácia do Produtor (%)	100	Acurácia do Usuário (%)	99,35	Classe 2 - Acurácia do Produtor (%)	100	Acurácia do Usuário (%)	100	
	Classe 3 - Acurácia do Produtor (%)	100	Acurácia do Usuário (%)	100	Classe 4 - Acurácia do Produtor (%)	100	Acurácia do Usuário (%)	100	
	Classe 5 - Acurácia do Produtor (%)	99,23	Acurácia do Usuário (%)	98,7	Classe 6 - Acurácia do Produtor (%)	98,3	Acurácia do Usuário (%)	99,31	
	Classe 7 - Acurácia do Produtor (%)	97,26	Acurácia do Usuário (%)	94,67	Classe 8 - Acurácia do Produtor (%)	98,8	Acurácia do Usuário (%)	100	

Fonte: O autor.

As Tabelas 16, 17 e 18 apresentam a quantidade de pixels para as oito classes definidas na aquisição das amostras, os valores de desempenho médio (acurácia global), a acurácia do produtor que se trata de um indicativo da probabilidade de um pixel de referência ser corretamente classificado e a acurácia do usuário que se trata de um indicativo da probabilidade de um pixel classificado na imagem realmente representar a sua categoria no campo (SUARES & CANDEIAS, 2012). No entanto, para se obter uma medida da precisão da classificação frente aos dados de referência, torna-se necessário a abordagem estatística de análise Kappa. Esta análise é definida como uma técnica multivariada discreta e muito utilizada na avaliação da precisão temática. Utiliza todos os elementos da matriz de confusão de classes no seu cálculo. Conceitualmente, o coeficiente Kappa pode ser definido como uma medida de concordância real (indicado pelos elementos diagonais da matriz) menos a concordância por chance (indicado pelo produto total da linha e coluna), podendo ser calculado pela Equação 1.16 (FIGUEIREDO & VIEIRA, 2007).

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (1.16)$$

Onde K é um estimativa do coeficiente Kappa, x_{ii} é o valor da linha i e coluna i , x_{i+} é a soma da linha i e x_{+i} é a soma da coluna i apresentada nas Tabela 16, 17 e 18; N é o número total de amostras e c o número total de classes.

A Tabela 19 apresenta os valores do coeficiente Kappa para o período estudado.

Tabela 19 - Valores de coeficiente Kappa para o período de estudo.

Período	Kappa
1997	0,838
2001	0,879
2005	0,839
2009	0,895
2014	0,991

Fonte: O Autor.

Embora muito utilizada pela comunidade científica para avaliar a exatidão do mapeamento, de acordo com Figueiredo & Vieira (2007), não se encontra uma fundamentação teórica que recomende quais níveis mínimos são aceitáveis para este coeficiente em uma classificação. No entanto, Landis & Koch (1977) propõem uma escala de avaliação da qualidade do processo de classificação, apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Coeficientes Kappa e desempenhos de classificação.

Índice Kappa	Desempenho
< 0	Péssimo
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Bom
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito bom
$0,8 < k \leq 1,0$	Excelente

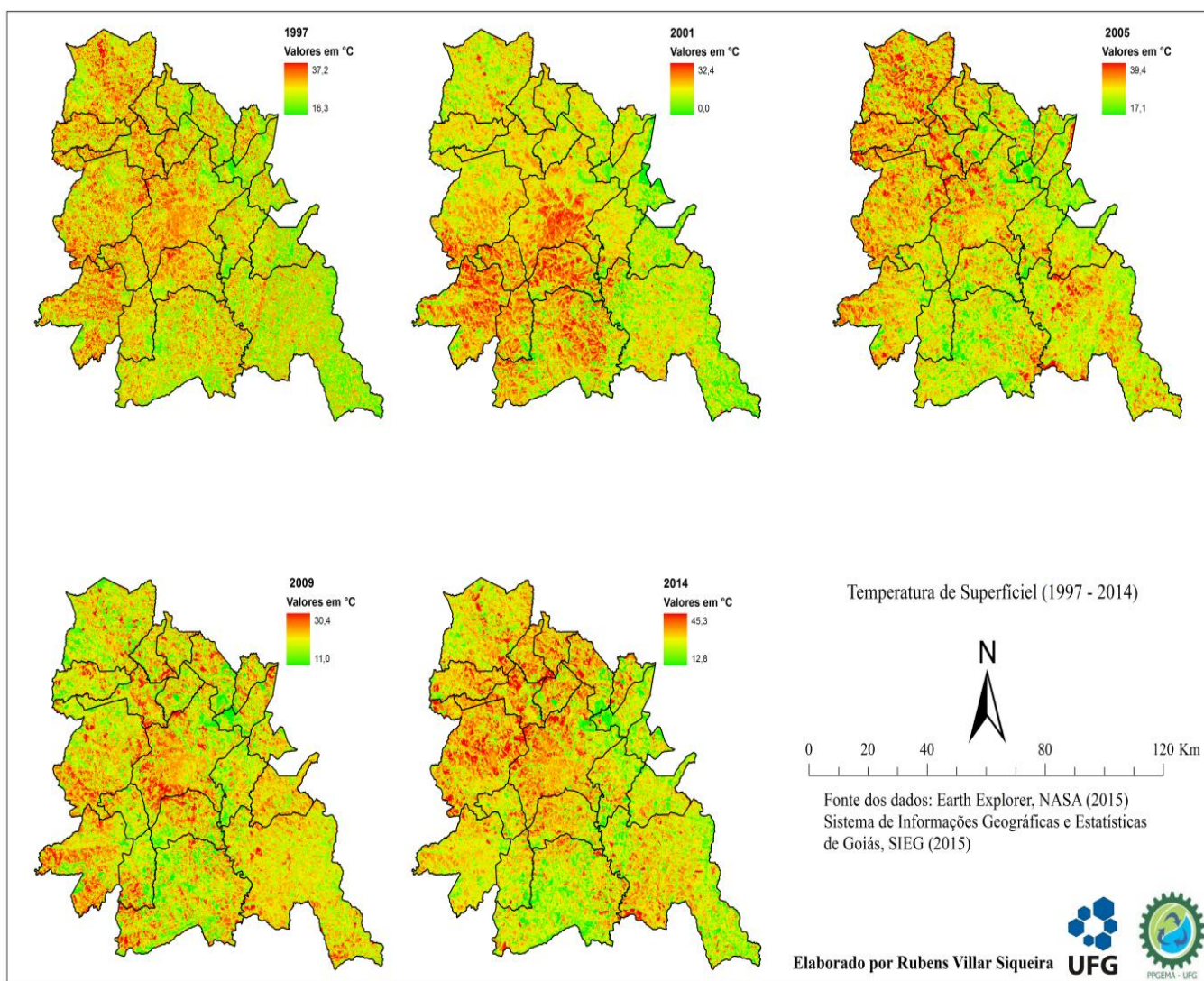
Fonte: Adaptado de Landis & Koch (1977).

Como os valores de emissividade que fazem parte do cálculo para a estimativa da temperatura de superfície, utilizam como referência a cobertura e uso do solo, torna-se importante estimar a precisão da classificação das imagens a fim de estabelecer a exatidão do mapa temático frente a sua representação no campo. Sendo assim, com valores expressivos de exatidão para a classificação é possível obter uma boa precisão para as temperaturas estimadas por imagens de satélites.

3.3.3 – TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

Os resultados para as estimativas da temperatura de superfície para Região Metropolitana de Goiânia, bem como a sua distribuição espacial são apresentados no mapa da Figura 22. Novamente, apresenta-se o mosaico de mapas em escala 1:700.000, para os anos de 1997, 2001, 2005, 2009 e 2014.

Figura 22 - Temperatura de Superfície para a Região Metropolitana de Goiânia (1997 - 2014).



Fonte: O autor.

No ano de 1997 foi registrado um valor de temperatura mínima de 16,3°C e máxima de 37,2°C. Para o ano de 2005 estes valores mudam para 17,1°C (mínima) e

39,4°C (máxima). Os anos de 2009 e 2014 apresentaram valores de temperatura mínima e máximas de 11,0°C, 30,4°C, 12,8°C e 45,3°C, respectivamente. Para o ano de 2001 ocorreu um caso atípico onde a temperatura mínima registra um valor de 0,0°C e a máxima de 32,4°C. No entanto, o conjunto de imagens para o ano de 2001, apresentaram uma alta complexidade na etapa de pré-processamento, essencial para correções de variabilidades estatísticas nas imagens, particularmente nas etapas de registro de imagens e concatenação (mosaico), devido a uma grande presença de nuvens. Acredita-se que esta discrepância no valor de temperatura mínima para o ano de 2001 ocorra devido a problemas nestas etapas.

Objetivando mensurar a precisão dos resultados das temperaturas estimadas por imagens de satélites, foram realizadas comparações destes valores com os valores de estações meteorológicas em campo. A estação meteorológica utilizada para esta análise foi a estação Goiânia, apresentando, na Tabela 22, dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 21 - Validação dos valores de temperatura.

Período	Temperatura da estação meteorológica (°C)	Temperatura obtida por satélite (°C)
1997	25,4	26,06
2001	22,6	23,6
2005	23,8	24,9
2009	23,2	21,3

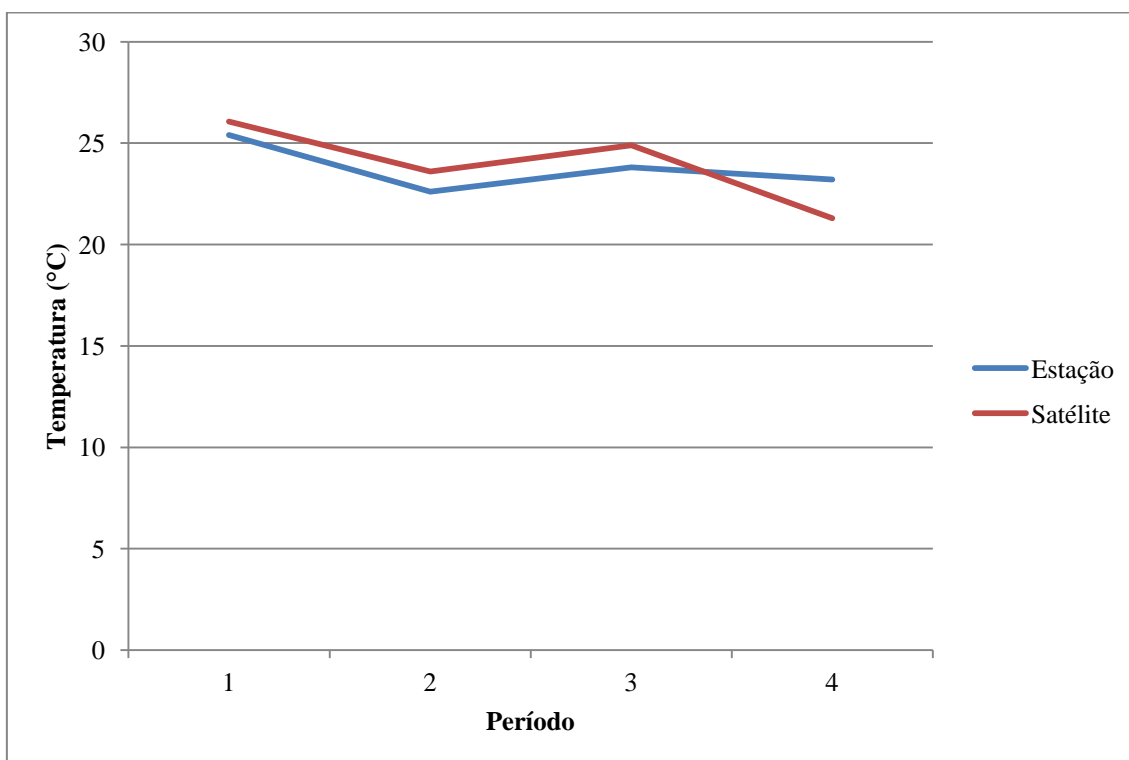
Fonte: O autor.

Como explicitado anteriormente, é necessário que os dados de comparação das estações meteorológicas sejam coletados no momento da passagem do satélite pela região, ou próximo a esse instante devido a alta variabilidade temporal da temperatura na superfície. Neste caso, os dados de temperatura das estações meteorológicas foram coletados nas datas de passagem do satélite e com horário de 12:00 horas.

As temperaturas estimadas por satélite oscilaram em relação aos dados das estações meteorológicas em valores de 0,7°C a 1,9°C. Tendo em vista a distância de aproximadamente 705 km da superfície, além de toda interferência na radiometria e reflectância dos alvos da superfície, os valores de temperatura medidas a nível do satélite se mostraram eficientes. Para as temperaturas do ano de 2014 esta comparação não foi realizada devido ao fato de, no momento deste trabalho, existirem dados para a estação Goiânia até a data de 02/10/2013. A Figura 23 apresenta o gráfico referente a

comparação das temperaturas estimadas por imagens e os dados observados das estações.

Figura 23 - Comparativo de temperaturas (Estação x Satélite).

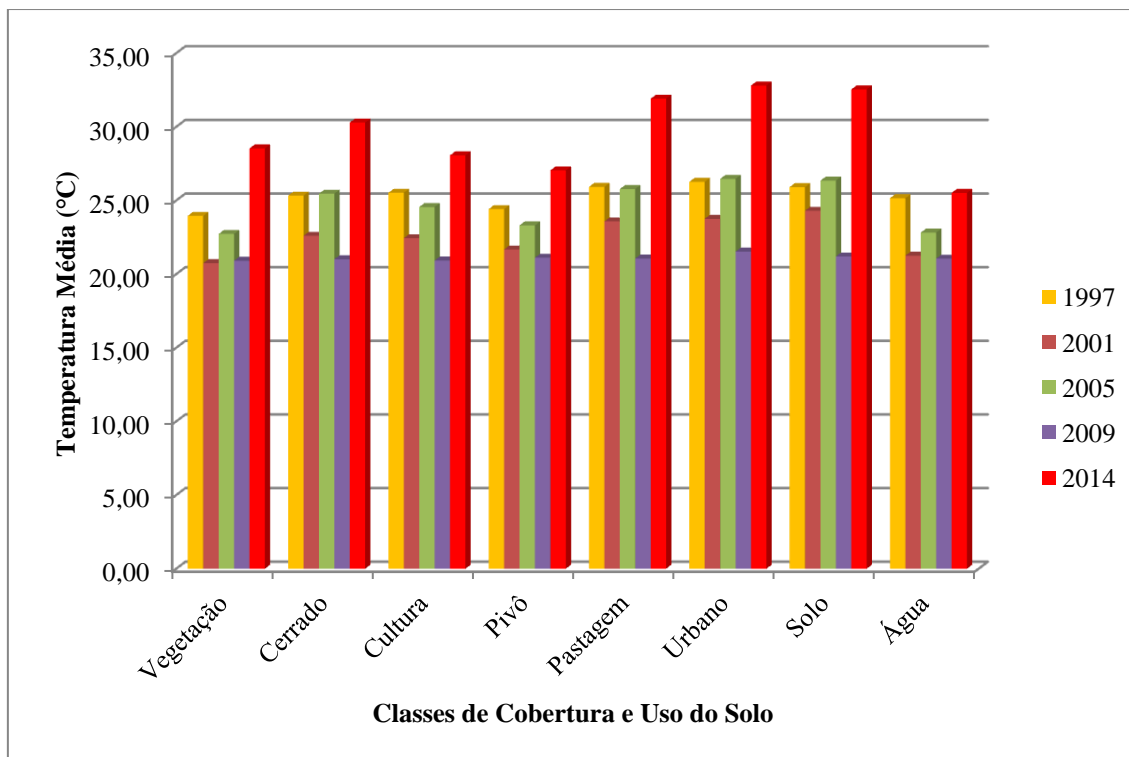


Fonte: O Autor.

No gráfico acima os períodos 1, 2, 3 e 4 correspondem aos anos de 1997, 2001, 2005 e 2009 respectivamente. Nota-se um comportamento similar entre as temperaturas estimadas por satélite com os dados observados das estações. O único comportamento atípico registrado foi para o período 4, correspondente ao ano de 2009, que registrou uma temperatura do satélite menor que a temperatura observada.

O comportamento quantitativo das estimativas das temperaturas para o período de estudo pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Representação gráfica das temperaturas médias para o período de 1997 a 2014.



Fonte: O autor.

Para o período de 2014 nota-se o aumento das temperaturas médias para todas as classes, comparando-as aos anos anteriores (Tabela 23). Este fato denota que o ano de 2014 se apresenta mais quente que os anos anteriores. Os anos de 2001 e 2009 se apresentaram menos quentes na Região Metropolitana de Goiânia.

Tabela 22 - Temperaturas médias (1997 - 2014).

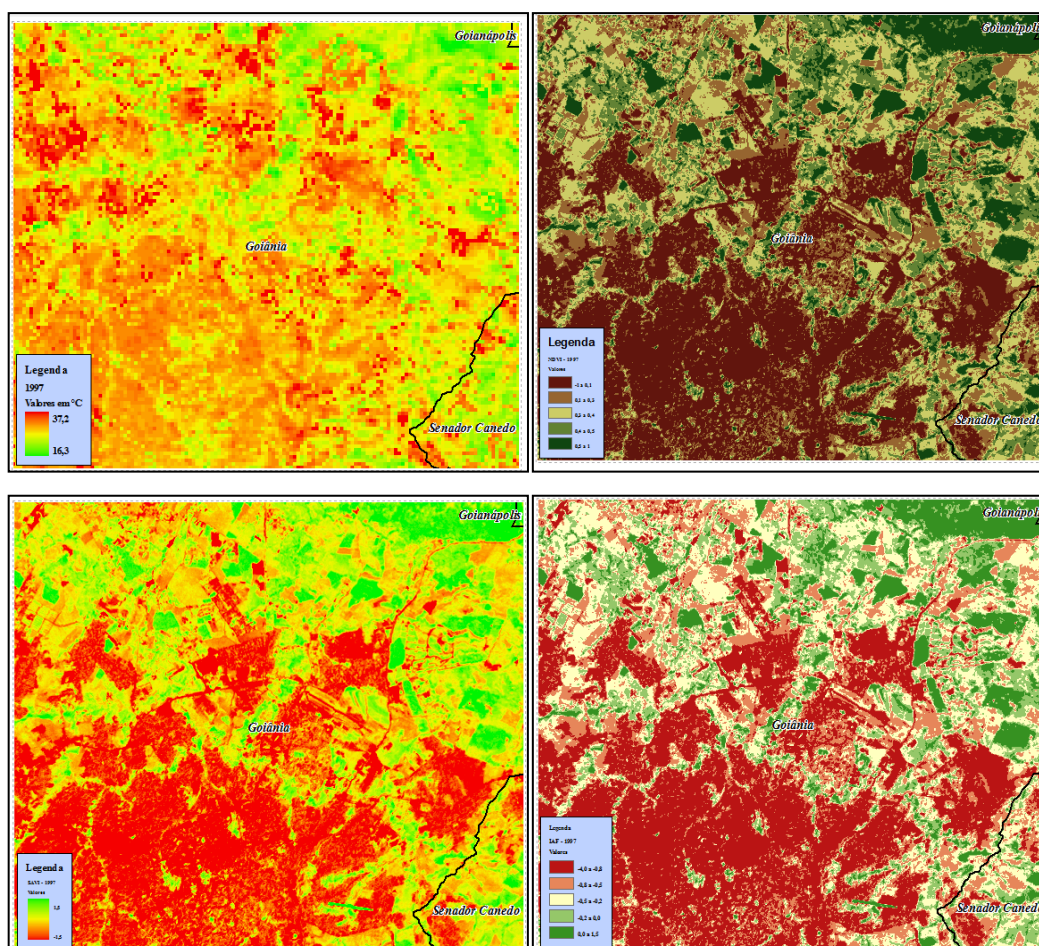
Classe/Período	Temperaturas médias (°C)				
	1997	2001	2005	2009	2014
Vegetação	23,96	20,74	22,73	20,91	28,53
Cerrado	25,33	22,60	25,46	21,01	30,29
Cultura	25,52	22,44	24,56	20,92	28,07
Pivô	24,41	21,67	23,31	21,11	27,04
Pastagem	25,92	23,58	25,77	21,06	31,91
Urbano	26,26	23,75	26,46	21,53	32,80
Solo	25,91	24,30	26,35	21,20	32,54
Água	25,15	21,25	22,82	21,05	25,51

Fonte: O autor.

Esse fato pode ser explicado pelo registro de várias agências científicas (NOAA, NASA) de que o ano de 2014 foi o mais quente da história, desde os anos de 1880, quando começaram as medições do aquecimento global.

Realizando uma análise comparativa entre as temperaturas de superfície e os índices de vegetação (IV's) foi possível estabelecer a relação entre os valores de IV's e de temperatura. Para o período estudado observa-se que os maiores valores de temperatura estão associados aos menores valores de IV's, Na região urbana, particularmente Goiânia, onde pode ser encontrado vegetação nativa remanescente e os IV's apresentam valores significativos ocorrem valores menores de temperatura, conforme pode ser observado pela Figura 25.

Figura 25 - Comparação dos índices de vegetação (IV's) x temperatura de superfície.



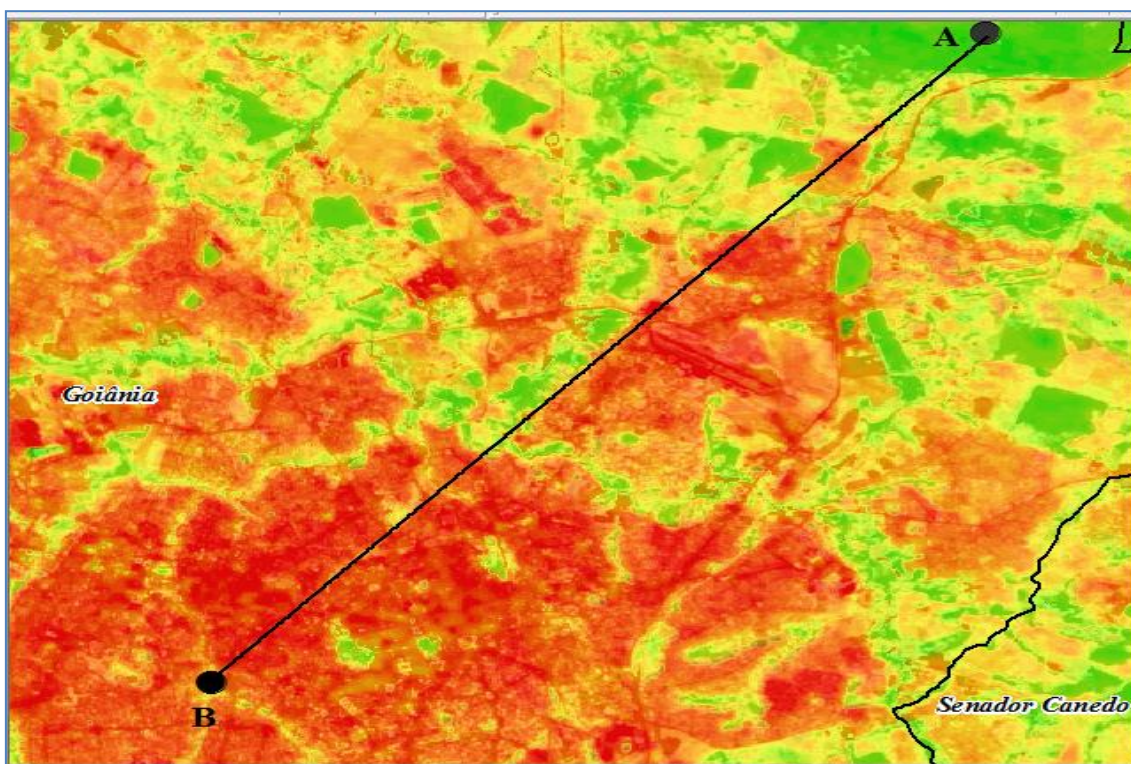
Fonte: O autor.

Em uma análise dos anos estudados, é possível notar que na região urbana existem fragmentos menores de temperaturas, decorrentes de parques. Na parte exterior

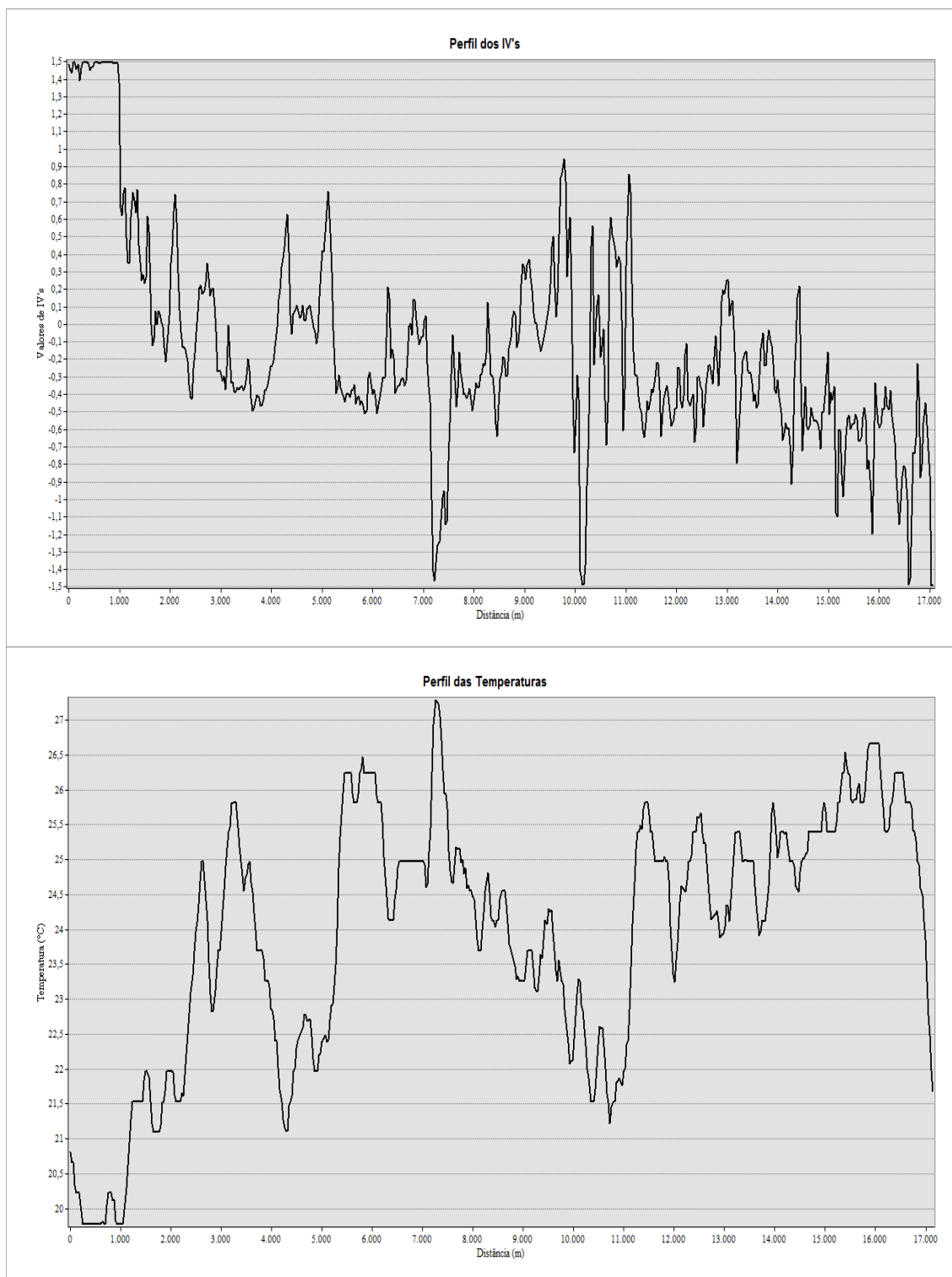
do perímetro urbano, os menores valores de temperatura decorrem de reservas legais e áreas de preservação permanente. As regiões com valores mais altos de IV's, auxiliam na redução da temperatura devido à evapotranspiração das plantas, processo que utiliza calor e energia e evita que o ar se aqueça, reduzindo o fluxo de calor sensível.

Foram realizados transectos nas imagens de satélite com os dados de temperatura em graus Celsius e nas imagens com dados dos índices de vegetação IV's. A linha de referência que representa o transecto percorre dois pontos (A e B), passando por áreas de transição de área urbana e área vegetadas, permitindo uma comparação do perfil de temperatura frente ao perfil dos IV's, Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Transecto de referência entre os pontos A e B.



Fonte: O autor.

Figura 27 - Comparativo entre os perfis de temperatura e IV's.

A Figura 26 mostra que os valores de IV's do ponto A localizam-se no pico do eixo das ordenadas, representada no perfil por valores de índices de vegetação. No entanto, para o mesmo ponto os valores de temperatura são menores. Comportamento

oposto ocorre para o ponto B. Comparando os dois perfis nota-se que os vales no perfil dos IV's correspondem aos picos no perfil das temperaturas. Pode-se afirmar que o comportamento entre temperatura e IV's são inversamente proporcionais, pois um alto valor de um (temperatura) resulta em um baixo valor de outro (IV's) e vice-versa.

3.3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo buscou realizar uma análise da temperatura sob diferentes aspectos, comparando-a com cobertura e uso do solo, índices de vegetação (NDVI, SAVI, IAF). Apesar de vários métodos disponíveis na literatura para estimativa da temperatura, o método adotado aqui se mostrou satisfatório e com valores próximos aos valores encontrados em estações meteorológicas em campo. Buscamos avaliar o impacto da cobertura e uso do solo na temperatura e os efeitos dos índices de vegetação nesta variável. Podemos constatar que a relação temperatura versus IV's segue um comportamento inversamente proporcional, onde valores mais altos de IV's registram em paralelo valores mais baixos de temperaturas e vice-versa.

Os maiores valores de temperatura média estão associados à classe denominada “Área Urbana ou Núcleo Rural”, com exceção para o ano de 2001 que registrou a maior temperatura média para a classe “Pastagem”. Dentre os valores de temperatura, na Região Metropolitana de Goiânia, o ano de 2014 se apresentou com uma maior amplitude com mínimas de 12,8°C e máximas de 45,3°C. Acompanhando a tendência de aquecimento global destacadas por várias agências de pesquisas o maior valor de temperatura máxima ocorreu no ano de 2014 para todo o período de estudo, no entanto, a Região Metropolitana de Goiânia manteve-se na média de aquecimento global, apresentando um aquecimento médio de 0,625°C contra o aumento global de 0,63°C.

O comportamento inverso entre temperatura e IV's pode ser explicado pela diminuição ao albedo e maior iluminação do solo, em áreas dos mapas com valores mais baixos de IV's, o que contribui para o aumento de temperaturas nestes locais. A correlação direta entre urbanização e valores mais altos de temperatura também pode ser constatado. Para o ano de 2009, o mapa de temperaturas médias mostra um contraste maior entre as áreas urbanizadas e o entorno, permitindo observar claramente os

polígonos vermelhos das manchas urbanas e sua linha direcional de temperatura acompanhando a mesma linha direcional do crescimento urbano em direção nordeste.

CAPITULO 4. MODELO PARA PREVISÃO DE TEMPERATURAS

Este capítulo apresenta os procedimentos técnicos empregados para a previsão de temperaturas mínimas, médias e máximas com a aplicação de modelos de séries temporais.

4.1 – INTRODUÇÃO

A possibilidade de aumento de temperatura e um clima regional mais quente torna-se uma probabilidade concreta devido aos resultados de ações antropogênicas como gases de efeito estufa e aerossóis. Como é possível observar por meio dos mapas do capítulo anterior, as temperaturas médias vem aumentando no decorrer dos anos, sendo que 2014 se apresentou com uma das épocas mais quentes. No entanto, um horizonte de planejamento futuro buscando melhorias para a infra-estrutura, seguros, política energética, dentre outros, pode ser a solução para a mediação e resposta rápida ao surgimento de crises e conflitos (Collin et al, 2002). Neste foco, o clima pode ser um elemento importante e de acordo com Scott et al (2005), Cubasch et al (2001) e Meehl et al (2007), as respostas das alterações climáticas podem acontecer a curto prazo, especialmente a nível regional, sendo bastante diferentes do aquecimento médio esperado a nível global, devido a pressão antropogênica.

De acordo com Smith et al (2007), estudos realizados (Griffies & Bryan, 1997; Grötzner et al, 1999; Collins & Sinha, 2003; Latif et al, 2004; Boer, 2004, Power et al, 2005) mostram que alguns aspectos da variabilidade interna da temperatura poderiam ser previsíveis com vários anos de antecedência, mas a habilidade preditiva real avaliada contra as observações reais não foi relatada para além de algumas temporadas. De acordo com Smith et al (2007), os modelos climáticos globais são utilizados para fazer previsões sobre as alterações climáticas em escalas de tempo de décadas ou mais. No entanto, estes modelos são responsáveis por projeções de mudanças ocasionadas por forças externas, negligenciando as informações sobre a variabilidade interna das cidades, necessária para prever o comportamento termal destes locais.

Neste caso, torna-se necessário que tais modelos de previsão de temperatura devam levar em conta a observação do estado da atmosfera a fim de prever a variabilidade interna da temperatura nas cidades, bem como as mudanças significativas que as fontes antropogênicas causam nos gases de efeito estufa e concentrações de aerossóis e as mudanças projetadas na irradiância solar (Smith et al, 2007).

No contexto abordado várias técnicas de previsão estatísticas são utilizadas para previsão climática. De fato, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) utiliza três modelos estatísticos para a previsão de chuvas e temperatura, sendo dois estocásticos: a Análise de Correlações Canônicas, o Método de Alisamento Exponencial de Holt-Winters e Projeção de Box-Jenkins (INMET, 2015).

A Análise de Correlações Canônicas é utilizada por Repelli & Nobre (sem data) para modelagem estatística das anomalias da temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico Tropical. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Andreoli & Kayano (sem data) fazem previsões de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical utilizando o mesmo modelo estatístico. Lucio et al (2010), utilizam os três modelos de forma combinada para previsão sazonal da precipitação no Brasil. Seguindo a mesma linha, Silva et al (sem data) utilizam os mesmos três modelos estatísticos para a previsão climática no INMET a nível continental, ou seja, Brasil. Particularmente, estes autores utilizam o aplicativo “Climate Predictability Tool” (CPT), desenvolvido pelo International Research Institute for Climate Prediction (IRI). Esta ferramenta utiliza métodos de previsões por Correlações Canônicas, Regressão por Componentes Principais e Regressão Linear Múltipla, levando em conta as séries históricas das estações meteorológicas. O aplicativo CPT também é utilizado por Ferreira et al (sem data) para analisar a influência da variabilidade da temperatura da superfície do mar sobre a produtividade de soja no Estado do Paraná.

Desta forma, este trabalho objetiva a previsão climática, utilizando um dos três modelos, no caso o modelo de suavização exponencial de Holt-Winters para prever, particularmente a temperatura, na Região Metropolitana de Goiânia para um período de 25 anos a fim de avaliar a dinâmica das temperaturas mínimas, médias e máximas e os efeitos de sua variabilidade neste período.

4.2 – MATERIAL E MÉTODOS

A parte metodológica para o desenvolvimento do presente trabalho envolveu técnicas e tecnologias combinadas organizadamente, conforme apresentado nos tópicos a seguir:

4.2.1 – MODELOS DE PREVISÃO CLIMÁTICA

Para auxiliar a tomada de decisões torna-se bastante comum tratar problemas cujas decisões a serem tomadas sejam funções de eventos futuros. Este fato, parte da premissa de que os dados descrevendo a situação de decisão precisam ser representativos do que ocorre no futuro.

Em meteorologia, um dos trabalhos mais árduos aos pesquisadores trata do tema da previsão do tempo a longo prazo, pois a exatidão a respeito da física dos processos de formação das condições do tempo nas diferentes regiões da Terra é desconhecido (KIM, sem ano). No entanto, na previsão estatística é possível utilizar dados históricos a partir de uma série de tempo. Este elemento é conhecido, de forma comum, em estatística, por séries temporais.

Uma série temporal é uma série de observações de alguma quantidade de interesse (uma variável aleatória – por exemplo, a temperatura) em relação ao tempo. Sendo assim, se tivermos uma variável aleatória X_i de interesse no tempo i e suas observações tomadas nos tempos $i = 1, 2, \dots, t$, então os valores observados $\{X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_t = x_t\}$ são uma série de tempo ou uma série temporal.

Devido ao fato de uma série temporal ser uma descrição do passado, um procedimento ideal para realizar previsões é fazer uso destes dados históricos. O raciocínio parte do princípio de que se esses dados passados são indicativos do que se pode esperar no futuro, permite-se, então, postular um modelo matemático que

represente o processo. Definido este modelo, o mesmo pode ser utilizado para realizar previsões. Como, na prática, não se tem o conhecimento da forma exata do modelo que gerará a série temporal, torna-se necessário a escolha de um modelo aproximado.

a) Uma série de tempo que é gerada por um processo com valor constante, superposto a flutuações aleatórias;

b) Uma série de tempo gerada por um processo linear, superposto a flutuações aleatórias e;

c) Uma série de tempo gerada por um processo com valor constante, superposto a variações sazonais e flutuações aleatórias.

4.2.1.1 – MODELO DE SUAVIZAÇÃO EXPONENCIAL DE HOLT-WINTERS

O modelo de Holt-Winters trata-se de uma técnica de ajustamento exponencial muito utilizada para prever valores de séries temporais. De acordo com Lúcio et al (2010), apresenta como vantagens simplicidade, baixo custo de operação, boa precisão e capacidade de ajustamento automático e rápido a mudanças na série.

A série temporal apresenta o isolamento de até três fatores: nível, tendência linear e sazonalidade ou fator sazonal. Os processos de suavização envolvem as médias aritméticas ponderadas, de forma que os pesos decrescem exponencialmente na medida em que se avança em períodos pretéritos. As equações de previsão deste modelo se apresentam de duas formas: aditiva e multiplicativa (LÚCIO et al, 2010). No primeiro caso são retratadas séries bem comportadas, onde a variabilidade dos fatores é constante. No segundo caso a variância dos fatores sazonais aumenta ou decresce com o nível implícito da série temporal.

A técnica de Holt-Winters pode ser caracterizada como parte de um conjunto de modelos de previsão abrangido pelo Método de Amortecimento Exponencial, utilizado normalmente para modelar tendências e/ou sazonalidades em séries temporais. Distingue-se dos modelos de regressão linear, devido ao fato de a todo instante buscar a determinação da melhor reta para cada instante de tempo, enquanto no problema de regressão, pretende-se definir a melhor reta que passa por todos os pontos. De acordo com Albuquerque (2012) o método utiliza médias móveis ponderadas exponencialmente

para atualizar as estimativas da média ajustada sazonalmente, inclinação e sazonalidade. Sendo assim considerando uma série temporal x_t com período igual a p método das estimativas por Holt-Winters são efetuadas utilizando as seguintes equações.

$$a_t = \alpha(x_t - S_{t-p}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \text{ et} \quad (1.17)$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (1.18)$$

$$S_t = \gamma(x_t - a_t) + (1 - \gamma)b_{t-p} \quad (1.19)$$

Onde: a_t , b_t e S_t são as estimativas para o nível, inclinação e o efeito da sazonalidade no período t . Os parâmetros α , β e γ são os parâmetros de suavização.

A previsão para os valores futuros x_{n+k} em k períodos à frente após a n -ésima observação é dada pela Equação 1.20.

$$x_{n+k|n} = a_n + kb_n + s_{n+k-p} \quad k \leq p \quad (1.20)$$

Onde: a_n é o nível estimado, b_n é a inclinação estimada e $a_n + kb_n$ é o nível estimado no tempo $n + k$ e s_{n+k-p} é a estimativa do peso exponencializado para o efeito sazonal no tempo $n + k - p$.

As equações 1.17 a 1.19 tratam da abordagem aditiva do método de Holt-Winters, mas uma outra forma deste método trata do efeito sazonal multiplicativo. Para este caso o conjunto de equações que devem ser aplicados à série temporal são:

$$a_n = \alpha \left(\frac{x_n}{s_{n-p}} \right) + (1 - \alpha)(a_{n-1} + b_{n-1}) \quad (1.21)$$

$$b_n = \beta(a_n - a_{n-1}) + (1 - \beta)b_{n-1} \quad (1.22)$$

$$s_n = \gamma \left(\frac{x_n}{a_n} \right) + (1 - \gamma)s_{n-p} \quad (1.23)$$

A Equação de previsão para o período x_{n+k} torna-se:

$$x_{n+k|n} = (a_n + kb_n)s_{n+k-p} \quad k \leq p \quad (1.24)$$

4.2.2 – APLICAÇÃO DO MÉTODO AOS DADOS DE TEMPERATURA

A análise dos dados de temperatura inicia-se com o comportamento das temperaturas mínimas, médias e máximas da estação Goiânia do INMET, por meio da análise descritiva destes dados. A Tabela 24 apresenta as estatísticas descritivas para os dados de temperatura mínimas, médias e máximas relacionados mensalmente para o intervalo de 31/01/1970 a 30/06/2015.

Tabela 23- Estatísticas descritivas para as temperaturas mínimas, médias e máximas. Estação Goiânia/INMET.

<i>Temperaturas Mínimas</i>		<i>Temperaturas Médias</i>		<i>Temperaturas Máximas</i>	
Média	18,21	Média	23,95	Média	30,66
Erro padrão	0,10	Erro padrão	0,06	Erro padrão	0,07
Mediana	19,17	Mediana	24,10	Mediana	30,54
Modo	15,46	Modo	24,45	Modo	29,57
Desvio padrão	2,39	Desvio padrão	1,42	Desvio padrão	1,51
Variância da amostra	5,69	Variância da amostra	2,01	Variância da amostra	2,29
Curtose	0,02	Curtose	0,30	Curtose	0,81
Assimetria	-0,90	Assimetria	-0,25	Assimetria	0,67
Intervalo	11,85	Intervalo	8,58	Intervalo	9,05
Mínimo	10,05	Mínimo	19,21	Mínimo	26,80
Máximo	21,90	Máximo	27,79	Máximo	35,85
Soma	9560,14	Soma	12572,95	Soma	16281,86
Contagem	525,00	Contagem	525,00	Contagem	531,00
Nível de confiança(95,0%)	0,20	Nível de confiança(95,0%)	0,12	Nível de confiança(95,0%)	0,13

Fonte: O autor.

Dentre os resultados apresentados na Tabela 24, podemos concluir para as temperaturas mínimas temos uma distribuição assimétrica negativa, com um grau de achatamento apresentando uma distribuição delgada (leptocúrtica), com valor de curtose menor que 0,263 (FONSECA & MARTINS, 1996). Os menores e maiores valores registrados de temperaturas mínimas no período estudado foram de 10,05°C e 21,9°C, respectivamente. Para as temperaturas médias os valores mínimos e máximos registrados no período foram de 19,21°C e 27,79°C, apresentando uma assimetria, também, negativa, similar às temperaturas mínimas, no entanto com um valor de assimetria menos acentuado. O valor de curtose ou achatamento apresentado é de 0,30,

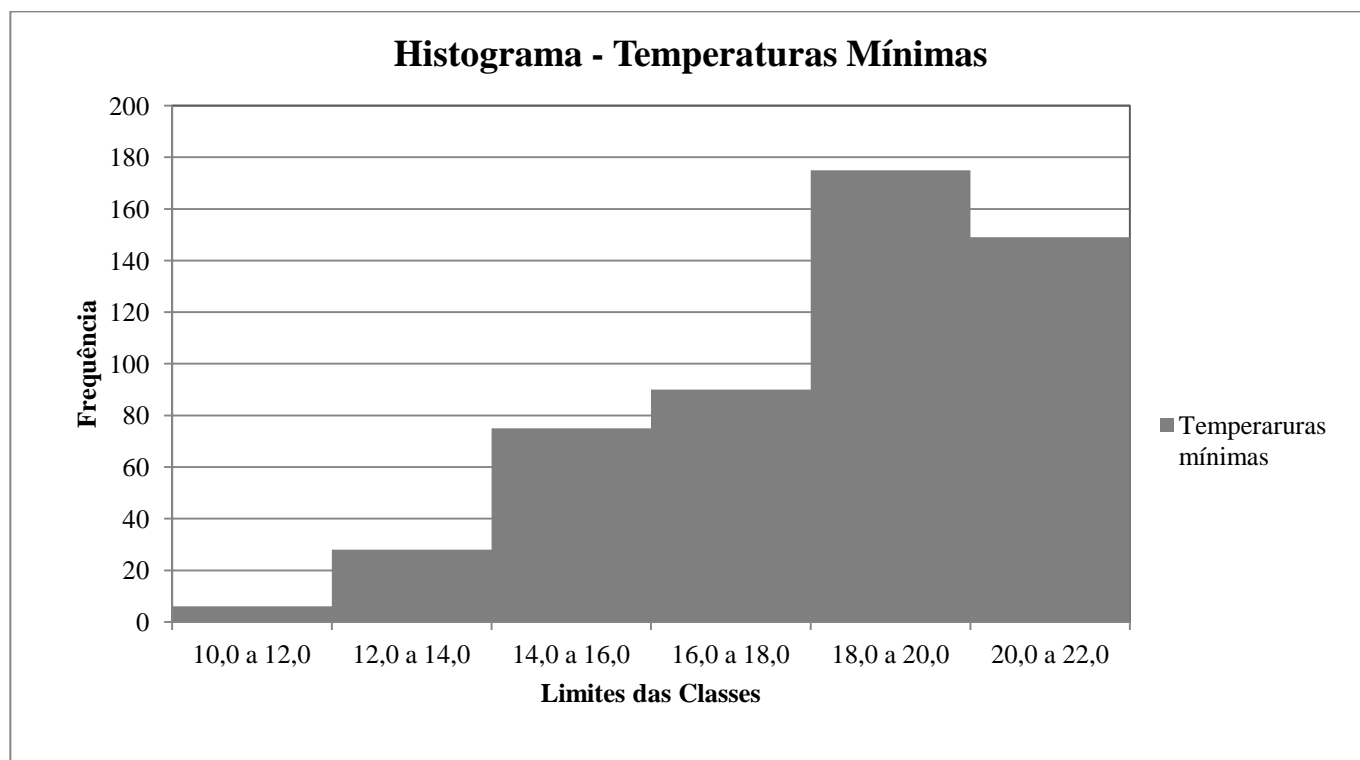
maior que 0,263, com uma distribuição achatada ou platicúrtica. As temperaturas máximas apresentaram uma assimetria positiva e uma distribuição achatada, também platicúrtica. As Tabelas 25, 26 e 27 apresentam as classes de temperaturas mínimas, médias e máximas, respectivamente e as Figuras 28, 29 e 30 apresentam os histogramas de frequências das temperaturas mínimas, médias e máximas para o período de estudo.

Tabela 24 - Classes e frequências das temperaturas mínimas.

Distribuição de Frequências das Temperaturas Mínimas		
Limite das Classes	Frequência	
	Absoluta	Relativa
10,0 a 12,0	6	1,1%
12,0 a 14,0	28	5,4%
14,0 a 16,0	75	14,3%
16,0 a 18,0	90	17,2%
18,0 a 20,0	175	33,5%
20,0 a 22,0	149	28,5%
Soma	523	100,0%

Fonte: O autor.

Figura 28 - Histograma das temperaturas mínimas



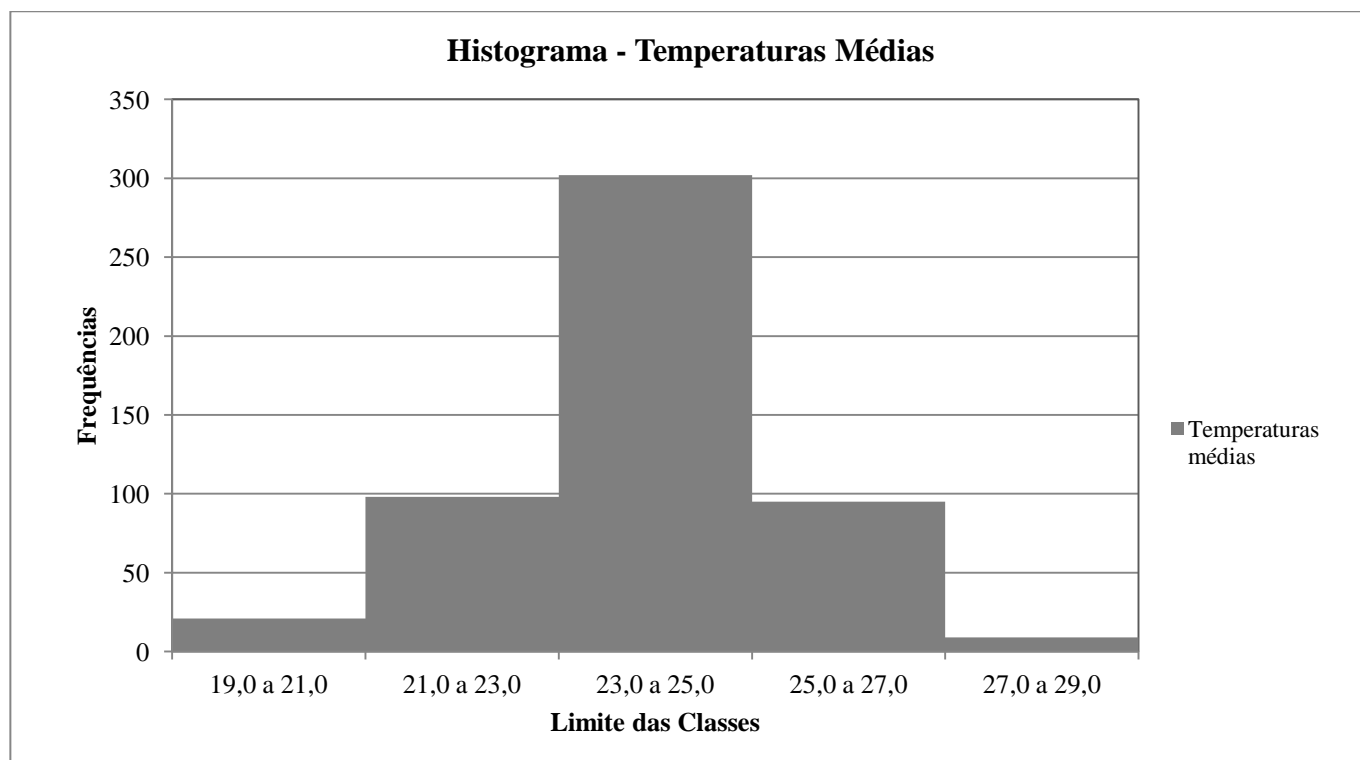
Fonte: O Autor.

Tabela 25- Classes e frequências das temperaturas médias.

Distribuição de Frequências das Temperaturas Médias		
Limite das Classes	Frequência	
	Absoluta	Relativa
19,0 a 21,0	21	4,0%
21,0 a 23,0	98	18,7%
23,0 a 25,0	302	57,5%
25,0 a 27,0	95	18,1%
27,0 a 29,0	9	1,7%
Soma	525	100,0%

Fonte: O autor.

Figura 29 - Histograma das temperaturas médias.



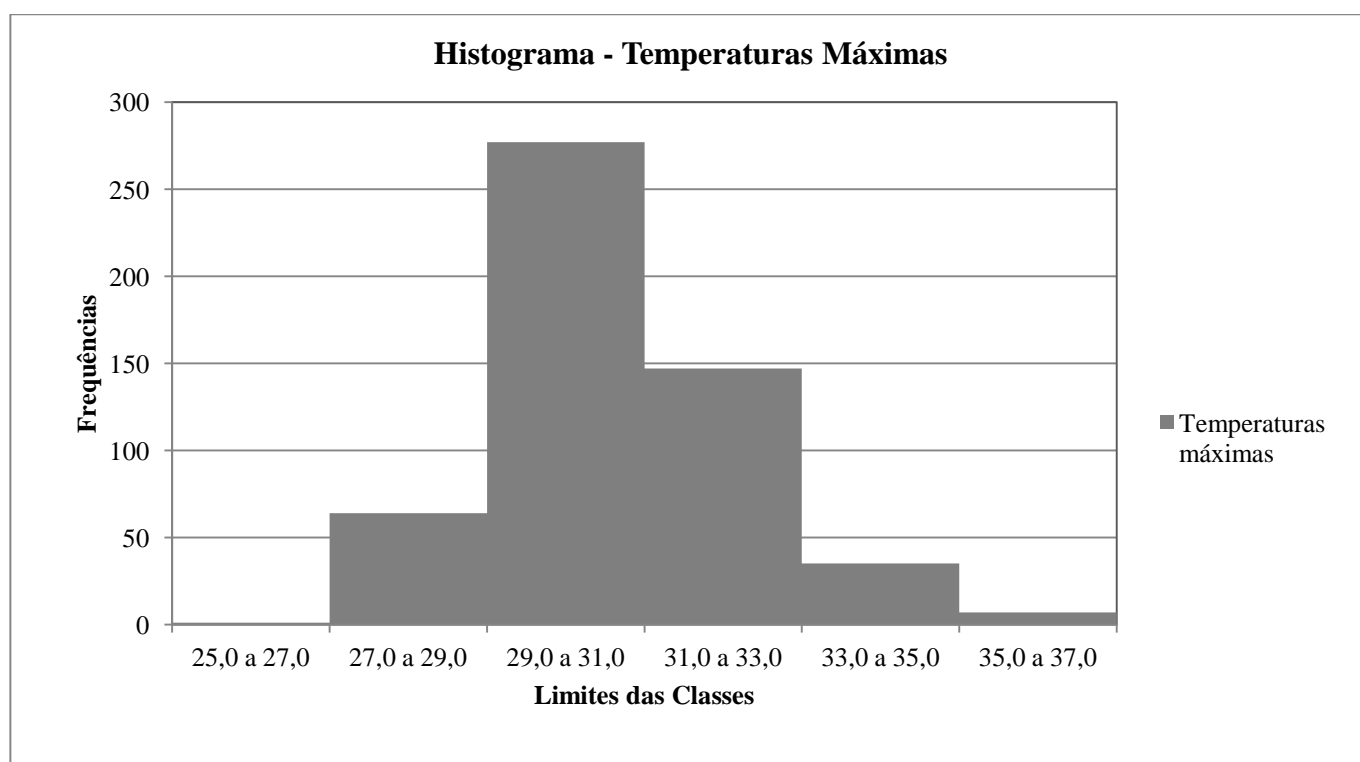
Fonte: O autor

Tabela 26 - Classes e frequências das temperaturas máximas.

Distribuição de Frequências das Temperaturas Máximas		
Limite das Classes	Frequência	
	Absoluta	Relativa
25,0 a 27,0	1	0,2%
27,0 a 29,0	64	12,1%
29,0 a 31,0	277	52,2%
31,0 a 33,0	147	27,7%
33,0 a 35,0	35	6,6%
35,0 a 37,0	7	1,3%
Soma	531	100,0%

Fonte: O autor.

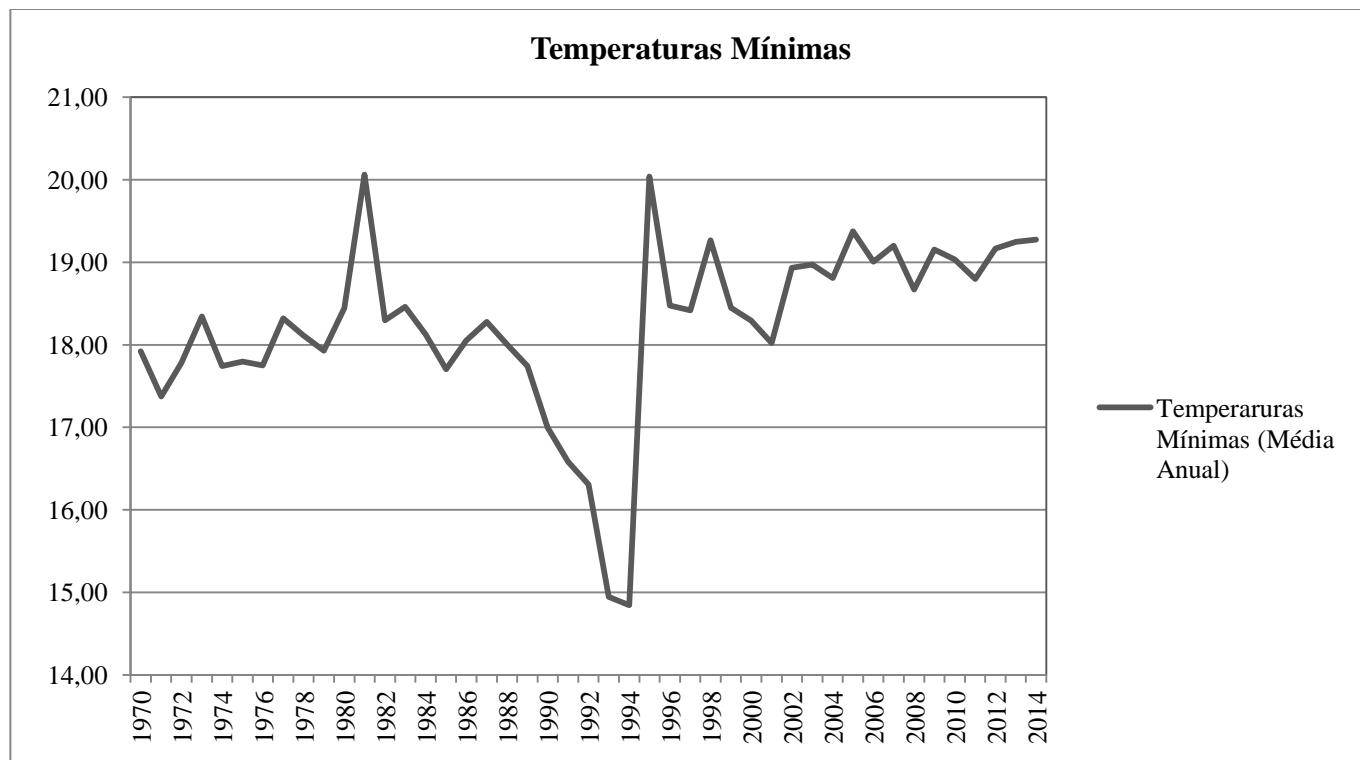
Figura 30 - Histograma das temperaturas máximas.



Fonte: O autor

O conjunto de dados da Estação Goiânia do INMET apresenta as temperaturas mensalmente para o período de 1970 a 2015. Para uma análise da evolução temporal das temperaturas mínimas, médias e máximas foram calculadas as médias anuais para o período estudado. Desta forma, a Figura 31 corresponde à evolução das temperaturas mínimas no período de 31/01/1970 a 31/12/2014, apresentando o comportamento temporal da temperatura no decorrer destes quarenta e quatro anos.

Figura 31 - Gráfico das temperaturas mínimas de acordo com o tempo.

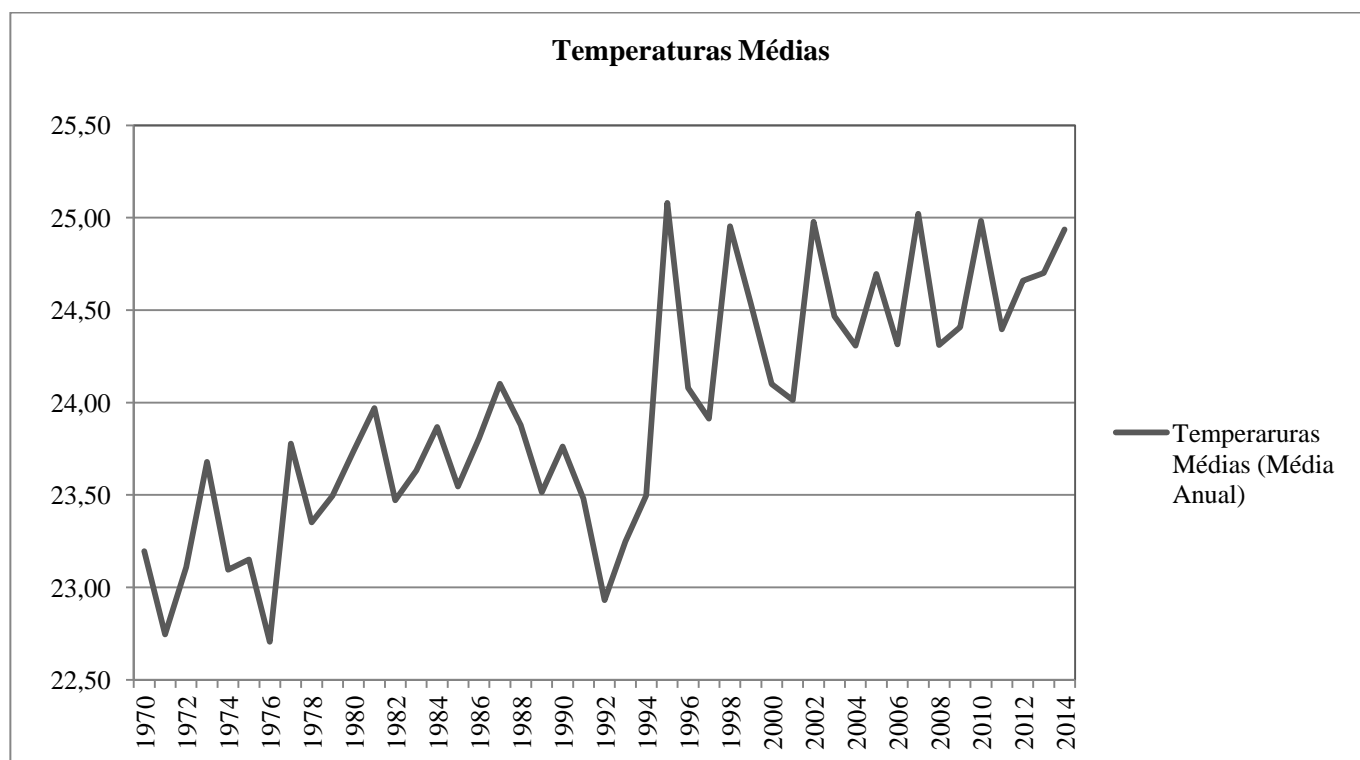


Fonte: O autor

Do gráfico acima é possível notar três elementos atípicos de temperaturas mínimas que ocorrem nos anos de 1981 e 1995 que registraram um valor alto de temperatura. No entanto, este fato pode ser explicado pela ausência de dados da Estação Goiânia que no ano de 1981 apresentam temperaturas somente para os meses de Novembro e Dezembro e para o ano de 1995 não são apresentados dados de temperaturas para os meses de Maio, Junho, Julho e Dezembro, ocasionando valores anômalos ou *outliers* dos dados. Para o ano de 1994, correspondente ao vale do gráfico acima, não constam dados de temperatura para o mês de Setembro. Mesmo assim, o ano de 1994 apresentou o menor valor de temperaturas mínimas, com média anual de 14,85 °C. Para o ano 2000 em diante, é possível notar que as temperaturas médias anuais começam a se elevar, registrando no gráfico um perfil com valores maiores que os períodos anteriores.

As temperaturas médias também apresentaram um comportamento crescente com o decorrer dos anos, como pode ser observado pela Figura 32, que apresenta as médias anuais das temperaturas médias para o mesmo período de 1970 a 2014.

Figura 32 - Gráfico das temperaturas médias de acordo com o tempo.

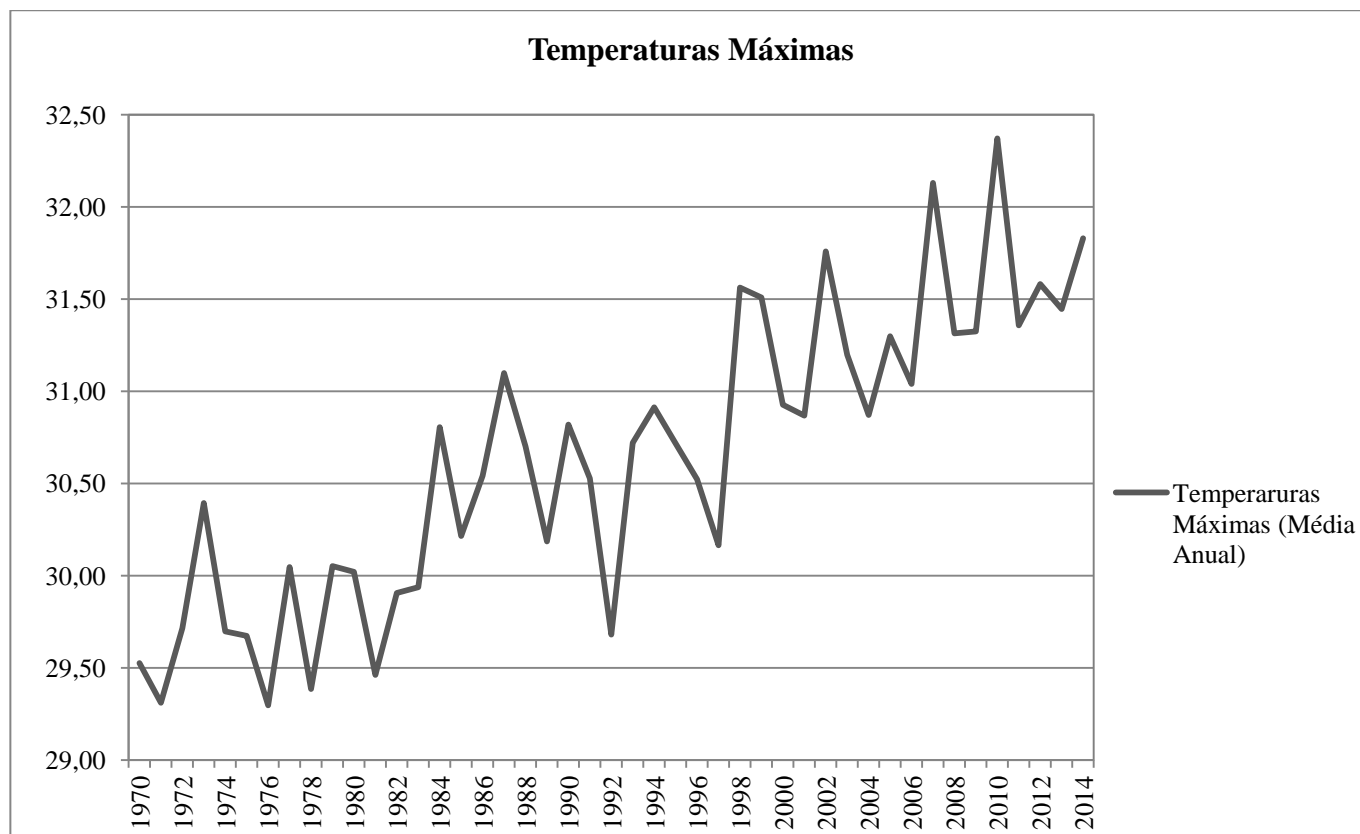


Fonte: O autor

Para as temperaturas médias nota-se por meio do gráfico da Figura 32, vários vales correspondentes aos menores valores de temperatura para os anos de 1971, 1976 e 1992. Em 1971 a temperatura média registrada pela estação foi de 22,75°C acompanhada de valores de 22,71°C para o ano de 1976 e 22,93°C para o ano de 1992. O ano de 1994 não apresenta registro de temperatura para o mês de Setembro, bem como o ano de 1995, sem registros de temperaturas médias para os meses de Maio, Junho, Julho e Dezembro. Portanto o pico acentuado correspondente ao ano de 1995 do gráfico ocorre devido a falta de dados para este mês, onde a média anual foi de 25,08°C. No entanto, torna-se interessante observar que após o ano 2000 os vales e picos do gráfico sempre se situam em valores de temperaturas mais elevados.

Analisando o gráfico da Figura 33, nota-se comportamento semelhante para as temperaturas máximas que para o ano 2000 apresentam picos e vales de temperaturas maiores que os anos anteriores.

Figura 33 - Gráfico das temperaturas máximas de acordo com o tempo.



Fone: O autor.

Observando os gráficos das Figuras 31, 32 e 33 pode-se concluir que após o ano 2000, na Região Metropolitana de Goiânia, ocorreu um aumento significativo nas temperaturas mínimas, médias e máximas. De fato, de acordo com a NASA, oito dos nove anos mais quentes da história, desde 1880, quando começaram os registros de temperatura, ocorreram após o ano 2000 (Revista Carta Capital, 2013). Podemos então afirmar que regionalmente, a Região Metropolitana de Goiânia, acompanhou esta tendência mundial, demonstrando que os eventos climáticos relatados por especialistas de diversos centros de pesquisa no mundo não ocorrem pontualmente e afetam de forma significativa os climas regionais.

No entanto, observando as Tabelas 25, 26 e 27, bem como os histogramas das Figuras 28, 29 e 30, nota-se que as temperaturas mais altas ocorrem com menos frequência. Para as temperaturas mínimas a maior ocorrência está na classe de 18,0°C a 20,0°C, no qual sua frequência no período estudado foi de 33,5%. Tratando ainda das temperaturas mínimas, a segunda maior frequência ocorre para a classe de valores mais

altos entre 20,0°C a 22,0°C com ocorrência de 28,5% do período. Para as temperaturas médias, apesar de apresentar uma amplitude entre 19,0°C e 29,0°C, a maior ocorrência se apresenta na classe entre 23,0°C a 25,0°C, onde para esta classe foi registrada uma frequência de 57,5%. Entre as classes de temperaturas máximas, a maior ocorrência se dá na classe de valores entre 29,0°C a 31,0°C com frequência de 52,2%. Este fato denota que apesar de as temperaturas terem se elevado após o ano 2000, elas não ocorreram de forma significativa nos valores mais altos, tanto para as temperaturas mínimas, quanto para as médias e máximas, se situando sempre nos intervalos de valores medianos.

No entanto, torna-se claro que um evento de aumento de temperaturas está ocorrendo, principalmente após o ano 2000. Desta forma por meio da análise multivariada aplicada a série temporal de temperaturas mínimas, médias e máximas será possível projetar uma previsão das temperaturas para as décadas seguintes a fim de observarmos seus valores e analisarmos seu comportamento. Para tal intento, nesta etapa do trabalho, em primeiro plano, foi aplicada a técnica multivariada de suavização exponencial de Holt-Winters (HOLT, 1957 & WINTERS, 1960). As equações 1.25 a 1.27, que tratam do método multiplicativo, foram aplicadas as séries de temperaturas mensais mínimas, médias e máximas a fim de avaliar os valores previstos frente aos valores observados no período de 1970 a 2015. De acordo com Bertolo (2015), este método multiplicativo trabalha por meio da aplicação recursiva de suas equações aos dados da série temporal. Sendo assim, esta aplicação deve se iniciar em algum período da série histórica, onde os valores de nível, tendência e sazonalidade devem ser estimados. Uma maneira simples de estimar estes valores é por meio da inicialização do nível e da tendência para um mesmo período m , onde o nível é determinado pela média da primeira estação por meio da Equação 1.25 (BERTOLO, 2015).

$$L_S = \frac{1}{S}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) \quad (1.25)$$

A tendência é inicializada utilizando duas estações completas ou dois períodos, conforme a Equação 1.26.

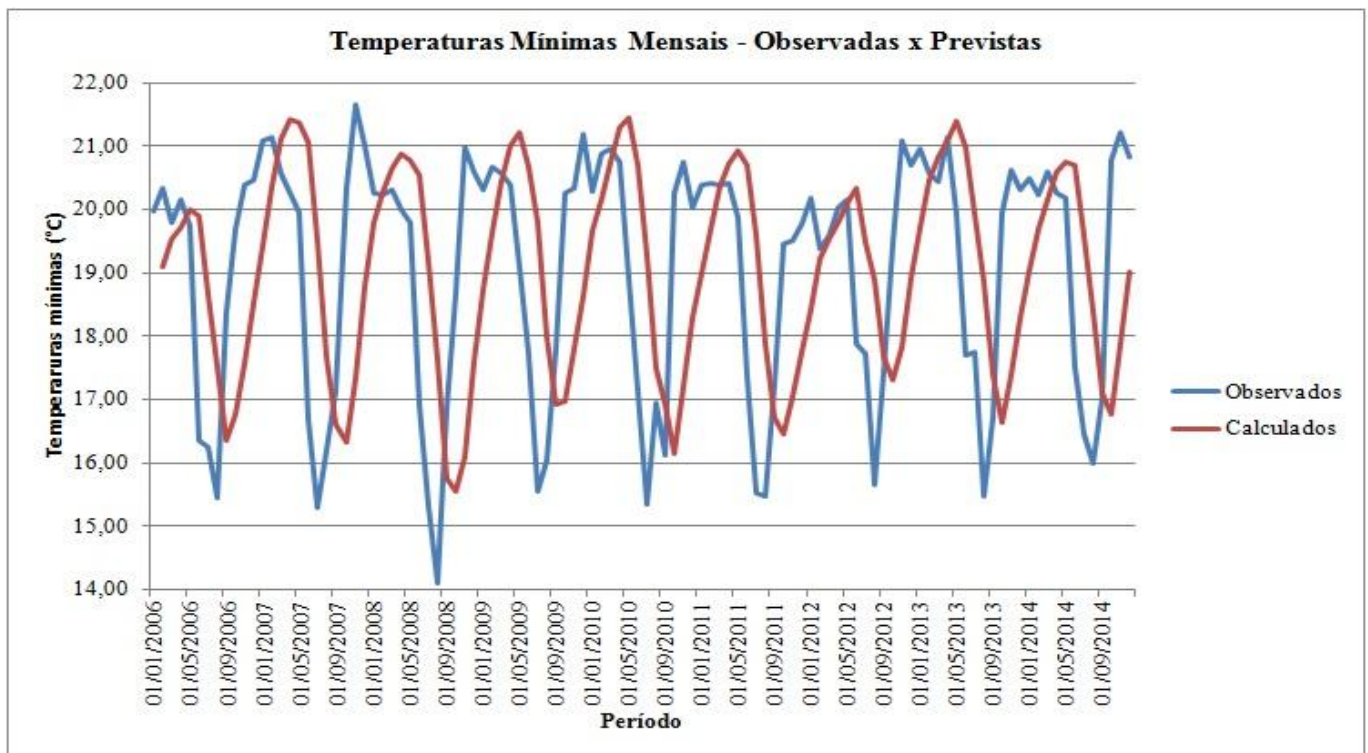
$$T_S = \frac{1}{S} \left(\frac{X_{S+1} - X_1}{S} + \frac{X_{S+2} - X_2}{S} + \dots + \frac{X_{S+S} - X_S}{S} \right) \quad (1.26)$$

Finalmente, a sazonalidade inicial pode ser determinada por meio da razão entre as primeiras observações da série histórica com a média do primeiro ano, de acordo com a Equação 1.27.

$$S_1 = \frac{x_1}{L_S}, S_2 = \frac{x_2}{L_S}, \dots, S_S = \frac{x_S}{L_S} \quad (1.27)$$

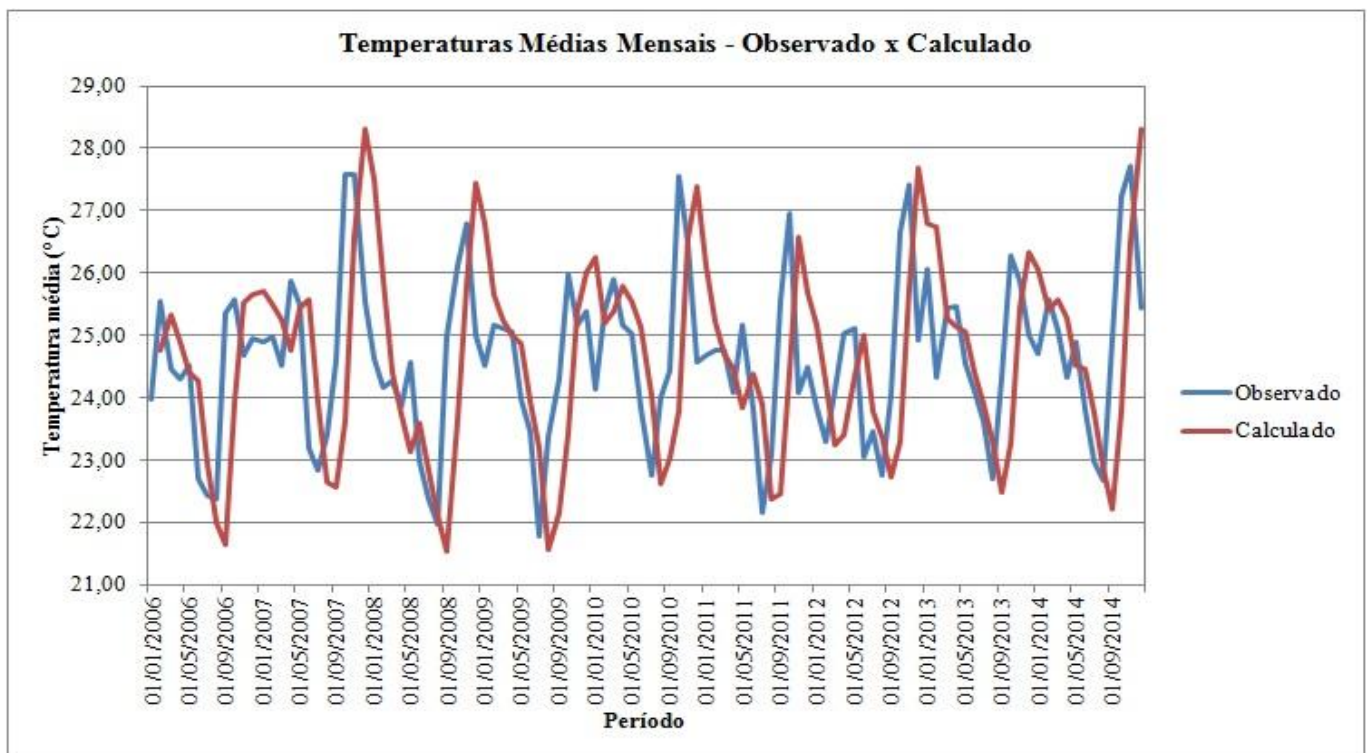
Os parâmetros α , β e γ que são constantes de suavização, devem ter seus valores entre 0 e 1 e a escolha destes valores é condicionada, geralmente, a algum critério. Neste trabalho escolhemos como critério inicial para as constantes o valor de 0,5. O primeiro experimento partiu da premissa em avaliar o comportamento do método de Holt-Winters para o período histórico mensal dos dados de temperaturas mínimas, médias e máximas da Estação Goiânia pertencente ao INMET. Após a análise mensal foi extraída a média anual do período histórico e aplicado o mesmo método para estes dados. Os valores encontrados de Erro Médio e Erro Médio Quadrático foram de 1,86°C e 5,26°C para as temperaturas mínimas mensais, 1,28°C e 2,66°C para as temperaturas médias mensais e finalmente 1,44°C e 3,62°C para as temperaturas máximas mensais. Os resultados das temperaturas observadas versus as novas temperaturas calculadas pelo presente método são apresentados pelos gráficos das Figuras 34, 35 e 36, para as temperaturas mínimas, médias e máximas mensais para o mesmo período histórico, respectivamente.

Figura 34 - Gráfico das temperaturas mínimas mensais pelo método de Holt-Winters.



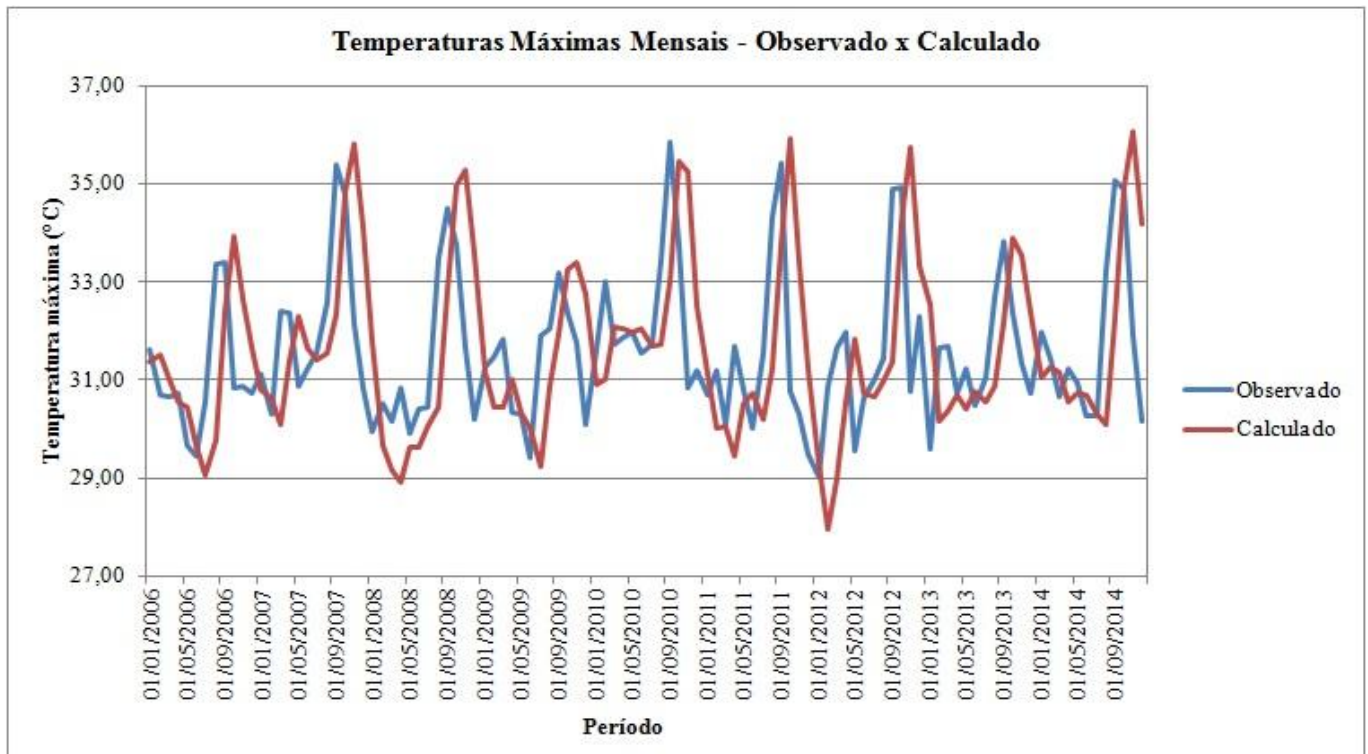
Fonte: O autor.

Figura 35 - Gráfico das temperaturas médias mensais pelo método de Holt-Winters.



Fonte: O autor.

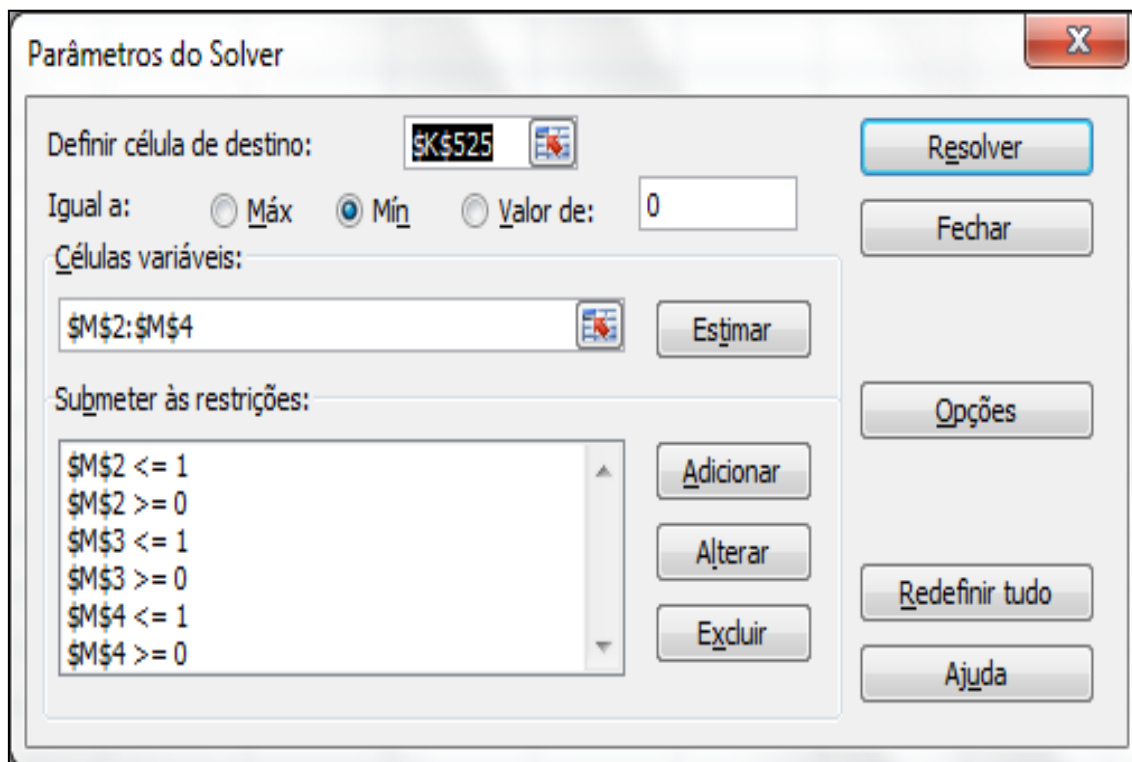
Figura 36 - Gráfico das temperaturas máximas mensais pelo método de Holt-Winters.



Fonte: O autor.

Por meio das Figuras podemos notar um comportamento adequado do método de Holt-Winters para os dados de temperaturas mensais, onde as curvas dos valores previstos se aproximam dos valores calculados. Convém ressaltar que os valores de α , β e γ tratam-se de constantes de suavização para os componentes de *nível*, *tendência* e *sazonalidade* respectivamente (BERTOLO, 2015). Devido ao fato de o critério inicial para as constantes de suavização terem gerado como resultado os valores de 0,5, posteriormente utilizou-se a ferramenta Solver do Excel para que estes valores fossem otimizados a fim de gerar um valor mínimo de Erro Médio Quadrático (FIGURA 37).

Figura 37 - Aplicação dos parâmetros do Solver do Excel.



Fonte: O autor.

Desta forma, os critérios escolhidos foram que os valores de α , β e γ se situassem no intervalo $\geq 0 \leq 1$, de forma que o Erro Médio Quadrático fosse minimizado. Após a aplicação do Solver os valores encontrados de α , β e γ foram melhorados, bem como do Erro Médio Quadrático e são apresentados na Tabela 28.

Tabela 27 - Resultado do Solver – Excel.

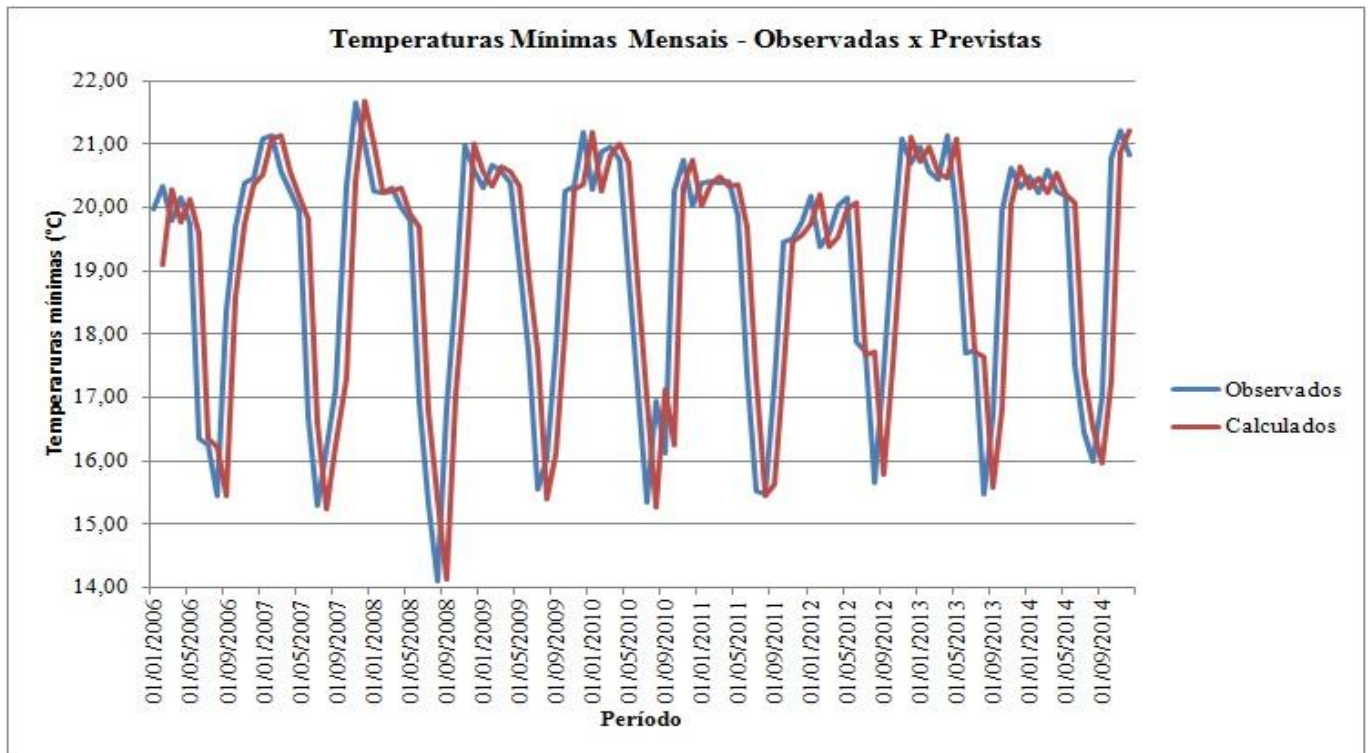
Resultados de Otimização			
Parâmetros	Temperaturas Mínimas	Temperaturas Médias	Temperaturas Máximas
	Mensais	Mensais	Mensais
α	0,17	0,98	1,00
β	0,00	0,05	0,00
γ	0,30	1,00	0,50
MSE	1,13	1,77	2,15

Fonte: O autor.

No entanto, apesar da significativa melhora nos valores das constantes de suavização, bem como no Erro Médio Quadrático, os resultados foram mais consistentes para o período histórico de temperaturas mensais. Um experimento foi

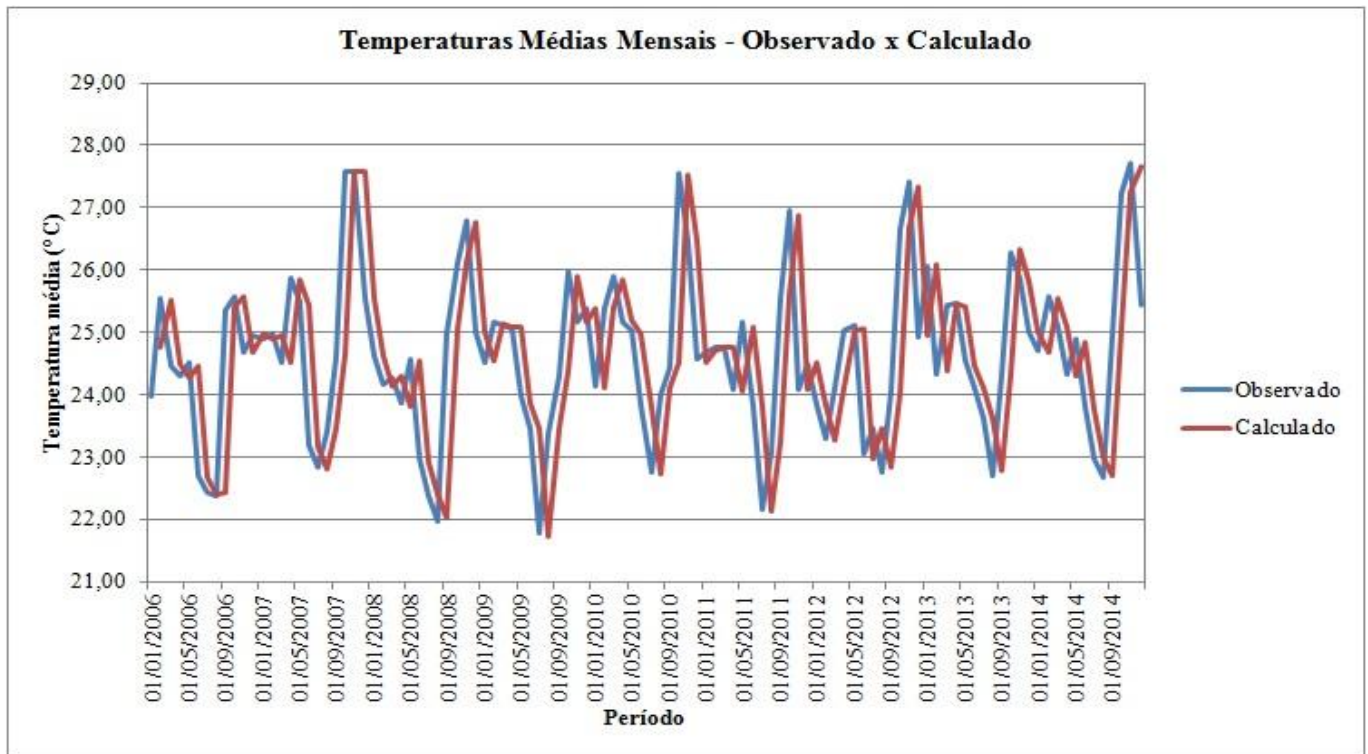
executado com as médias anuais, no entanto, a mesma melhora não foi observada para o período histórico de temperaturas anuais. Os resultados para as temperaturas mensais são apresentados pelas Figuras 38, 39, 40, que correspondem aos gráficos das temperaturas mínimas, médias e máximas mensais observadas versus previstas resultantes da aplicação do Solver.

Figura 38 - Gráfico das temperaturas mínimas mensais – otimização pelo Solver-Excel.



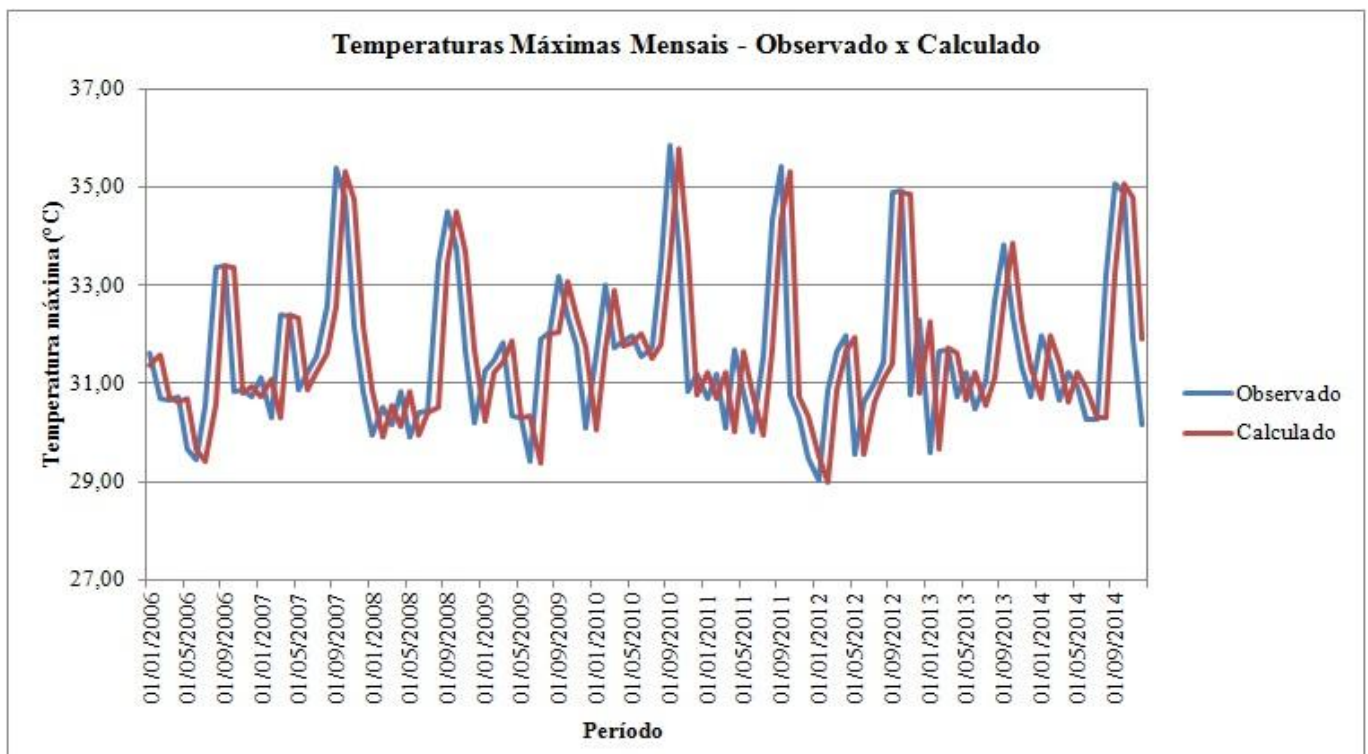
Fonte: O autor

Figura 39 - Gráfico das temperaturas médias mensais – otimização pelo Solver-Excel.



Fonte: O autor

Figura 40 - Gráfico das temperaturas máximas mensais – otimização pelo Solver-Excel.



Fonte: O autor.

Nota-se nos gráficos acima que após a otimização com o Solver do programa Excel as curvas das temperaturas calculadas se ajustam às curvas das temperaturas registradas pela estação meteorológica do INMET. Após esta etapa, com os valores e os coeficientes ajustados e com os erros reduzidos, procedeu-se a estimativa das temperaturas mínimas, médias e máximas para os períodos posteriores. Para as temperaturas mínimas, o método de Holt-Winters permitiu uma estimativa mensal entre os anos de 2040 a 2047. Os valores de temperaturas mínimas mensais são apresentados na Tabela 29.

Tabela 28 - Temperaturas mínimas mensais previstas para os anos de 2040 a 2047.

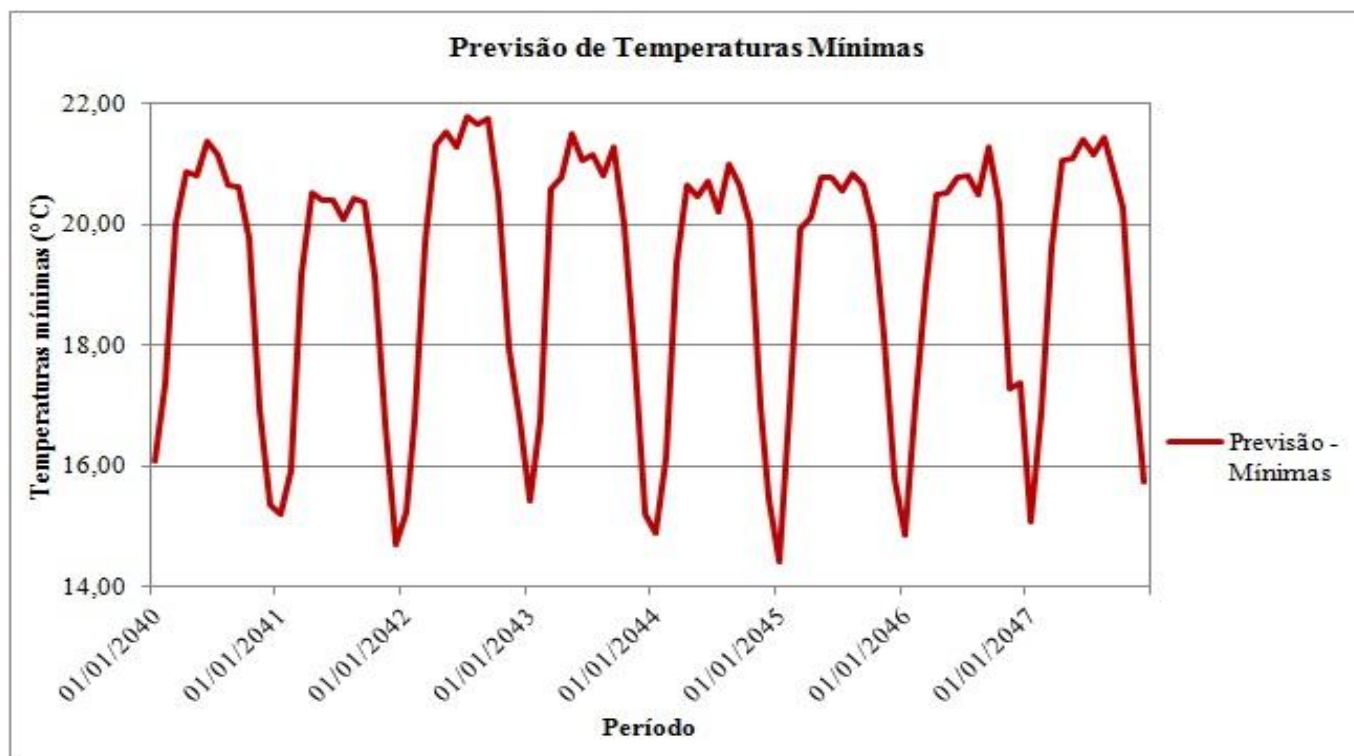
Mês/Ano	Temperaturas Mínimas	Mês/Ano	Temperaturas Mínimas	Mês/Ano	Temperaturas Mínimas	Mês/Ano	Temperaturas Mínimas
jan-40	16,08	jan-42	15,24	jan-44	14,90	jan-46	14,87
fev-40	17,39	fev-42	16,78	fev-44	16,14	fev-46	17,07
mar-40	20,03	mar-42	19,69	mar-44	19,35	mar-46	18,98
abr-40	20,86	abr-42	21,32	abr-44	20,65	abr-46	20,50
mai-40	20,80	mai-42	21,54	mai-44	20,45	mai-46	20,53
jun-40	21,39	jun-42	21,28	jun-44	20,70	jun-46	20,79
jul-40	21,14	jul-42	21,79	jul-44	20,20	jul-46	20,81
ago-40	20,66	ago-42	21,64	ago-44	21,01	ago-46	20,48
set-40	20,63	set-42	21,76	set-44	20,66	set-46	21,29
out-40	19,78	out-42	20,45	out-44	20,01	out-46	20,34
nov-40	16,94	nov-42	17,95	nov-44	17,00	nov-46	17,29
dez-40	15,36	dez-42	16,80	dez-44	15,45	dez-46	17,39
jan-41	15,21	jan-43	15,42	jan-45	14,43	jan-47	15,09
fev-41	15,92	fev-43	16,80	fev-45	17,02	fev-47	16,89
mar-41	19,17	mar-43	20,58	mar-45	19,92	mar-47	19,61
abr-41	20,51	abr-43	20,77	abr-45	20,11	abr-47	21,05
mai-41	20,40	mai-43	21,51	mai-45	20,77	mai-47	21,08
jun-41	20,41	jun-43	21,06	jun-45	20,76	jun-47	21,40
jul-41	20,07	jul-43	21,15	jul-45	20,54	jul-47	21,16
ago-41	20,44	ago-43	20,81	ago-45	20,84	ago-47	21,44
set-41	20,36	set-43	21,28	set-45	20,64	set-47	20,82
out-41	19,15	out-43	19,99	out-45	19,95	out-47	20,26
nov-41	16,68	nov-43	17,78	nov-45	18,12	nov-47	17,64
dez-41	14,70	dez-43	15,22	dez-45	15,81	dez-47	15,74

Fonte: O autor.

Na Tabela acima, observa-se que o método conseguiu computar a sazonalidade mensal das temperaturas, ou seja, os meses com período chuvoso que começam em meados de Outubro e se estende até Março tiveram temperaturas mais baixas e por

consequente, os meses com período de estiagem com início em meados de Abril até meados de Setembro, temos as temperaturas mínimas mais elevadas. A Figura 41 apresenta o gráfico dos valores previstos das temperaturas mínimas mensais para período computado na Tabela 29.

Figura 41 - Gráfico da previsão das temperaturas mínimas mensais.



Fonte: O autor.

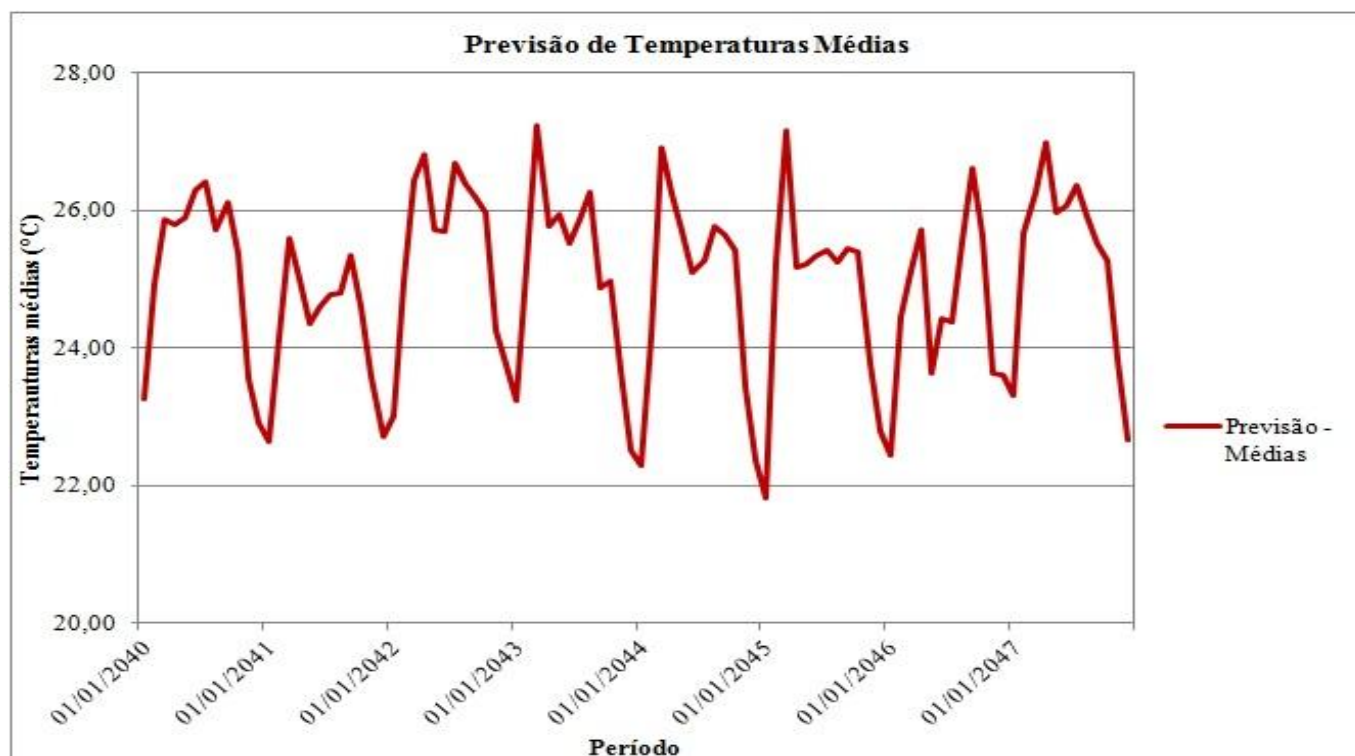
As temperaturas médias mensais foram computadas para o mesmo período entre os anos de 2040 a 2047, bem como para as temperaturas máximas mensais. Os resultados encontrados são apresentados nas Tabelas 30 e 31 para as temperaturas médias e máximas mensais, respectivamente. As Figuras 42 e 43 apresentam os gráficos das temperaturas médias e máximas mensais para o período computado pelo método multiplicativo de Holt-Winters.

Tabela 29 - Temperaturas médias mensais previstas para os anos de 2040 a 2047.

Mês/Ano	Temperaturas Médias	Mês/Ano	Temperaturas Médias	Mês/Ano	Temperaturas Médias	Mês/Ano	Temperaturas Médias
jan-40	23,26	jan-42	23,00	jan-44	22,29	jan-46	22,44
fev-40	24,93	fev-42	24,97	fev-44	24,17	fev-46	24,44
mar-40	25,85	mar-42	26,44	mar-44	26,90	mar-46	25,12
abr-40	25,78	abr-42	26,82	abr-44	26,24	abr-46	25,72
mai-40	25,90	mai-42	25,71	mai-44	25,70	mai-46	23,62
jun-40	26,29	jun-42	25,69	jun-44	25,10	jun-46	24,42
jul-40	26,40	jul-42	26,68	jul-44	25,27	jul-46	24,37
ago-40	25,71	ago-42	26,40	ago-44	25,75	ago-46	25,54
set-40	26,11	set-42	26,19	set-44	25,65	set-46	26,61
out-40	25,37	out-42	25,97	out-44	25,42	out-46	25,62
nov-40	23,56	nov-42	24,25	nov-44	23,43	nov-46	23,62
dez-40	22,90	dez-42	23,76	dez-44	22,37	dez-46	23,61
jan-41	22,63	jan-43	23,23	jan-45	21,82	jan-47	23,32
fev-41	24,14	fev-43	25,19	fev-45	25,26	fev-47	25,66
mar-41	25,60	mar-43	27,23	mar-45	27,15	mar-47	26,27
abr-41	25,00	abr-43	25,76	abr-45	25,16	abr-47	26,98
mai-41	24,36	mai-43	25,94	mai-45	25,21	mai-47	25,98
jun-41	24,59	jun-43	25,52	jun-45	25,34	jun-47	26,07
jul-41	24,78	jul-43	25,86	jul-45	25,43	jul-47	26,35
ago-41	24,80	ago-43	26,27	ago-45	25,24	ago-47	25,91
set-41	25,35	set-43	24,87	set-45	25,43	set-47	25,52
out-41	24,61	out-43	24,97	out-45	25,39	out-47	25,27
nov-41	23,57	nov-43	23,69	nov-45	23,77	nov-47	23,83
dez-41	22,72	dez-43	22,51	dez-45	22,78	dez-47	22,65

Fonte: O autor.

Figura 42 - Gráfico da previsão das temperaturas médias mensais.



Fonte: O autor

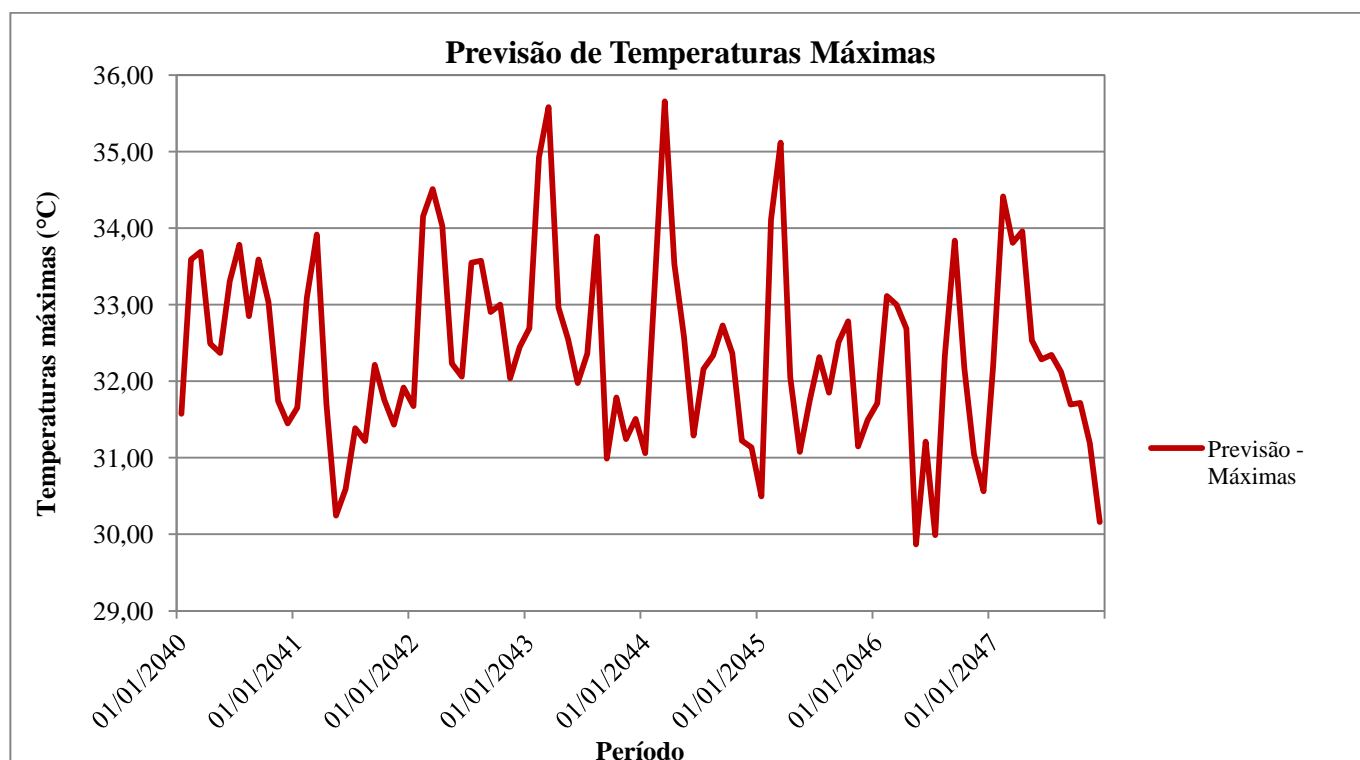
Tabela 30 - Temperaturas máximas mensais previstas para os anos de 2040 a 2047.

Mês/Ano	Temperaturas Máximas	Mês/Ano	Temperaturas Máximas	Mês/Ano	Temperaturas Máximas	Mês/Ano	Temperaturas Máximas
jan-40	31,58	jan-42	31,68	jan-44	31,06	jan-46	31,71
fev-40	33,59	fev-42	34,15	fev-44	33,35	fev-46	33,11
mar-40	33,69	mar-42	34,51	mar-44	35,66	mar-46	33,00
abr-40	32,49	abr-42	34,03	abr-44	33,53	abr-46	32,69
mai-40	32,37	mai-42	32,23	mai-44	32,58	mai-46	29,87
jun-40	33,30	jun-42	32,06	jun-44	31,29	jun-46	31,21
jul-40	33,78	jul-42	33,55	jul-44	32,16	jul-46	29,99
ago-40	32,85	ago-42	33,57	ago-44	32,34	ago-46	32,33
set-40	33,59	set-42	32,90	set-44	32,73	set-46	33,84
out-40	33,04	out-42	33,00	out-44	32,36	out-46	32,17
nov-40	31,74	nov-42	32,04	nov-44	31,22	nov-46	31,05
dez-40	31,45	dez-42	32,45	dez-44	31,13	dez-46	30,56
jan-41	31,66	jan-43	32,69	jan-45	30,50	jan-47	32,20
fev-41	33,09	fev-43	34,93	fev-45	34,11	fev-47	34,42
mar-41	33,92	mar-43	35,58	mar-45	35,12	mar-47	33,81
abr-41	31,70	abr-43	32,96	abr-45	32,06	abr-47	33,96
mai-41	30,25	mai-43	32,55	mai-45	31,08	mai-47	32,53
jun-41	30,59	jun-43	31,98	jun-45	31,75	jun-47	32,29

jul-41	31,39	jul-43	32,36	jul-45	32,32	jul-47	32,34
ago-41	31,22	ago-43	33,89	ago-45	31,85	ago-47	32,12
set-41	32,22	set-43	30,99	set-45	32,51	set-47	31,70
out-41	31,75	out-43	31,79	out-45	32,78	out-47	31,72
nov-41	31,43	nov-43	31,24	nov-45	31,15	nov-47	31,19
dez-41	31,92	dez-43	31,51	dez-45	31,50	dez-47	30,16

Fonte: O autor.

Figura 43 - Gráfico da previsão das temperaturas máximas mensais.



Fonte: O autor

Da mesma forma que para as temperaturas mínimas, nota-se que o método computou a sazonalidade do período histórico na previsão para as temperaturas médias e máximas mensais. Com o objetivo de acompanhar o comportamento das temperaturas resultantes da nova previsão foram calculados os histogramas de frequências para as temperaturas mínimas, médias e máximas para o período de 2040 a 2047. A Tabela 32 apresenta as novas classes de temperaturas mínimas bem como frequências de ocorrências destas novas temperaturas para o período computado na previsão.

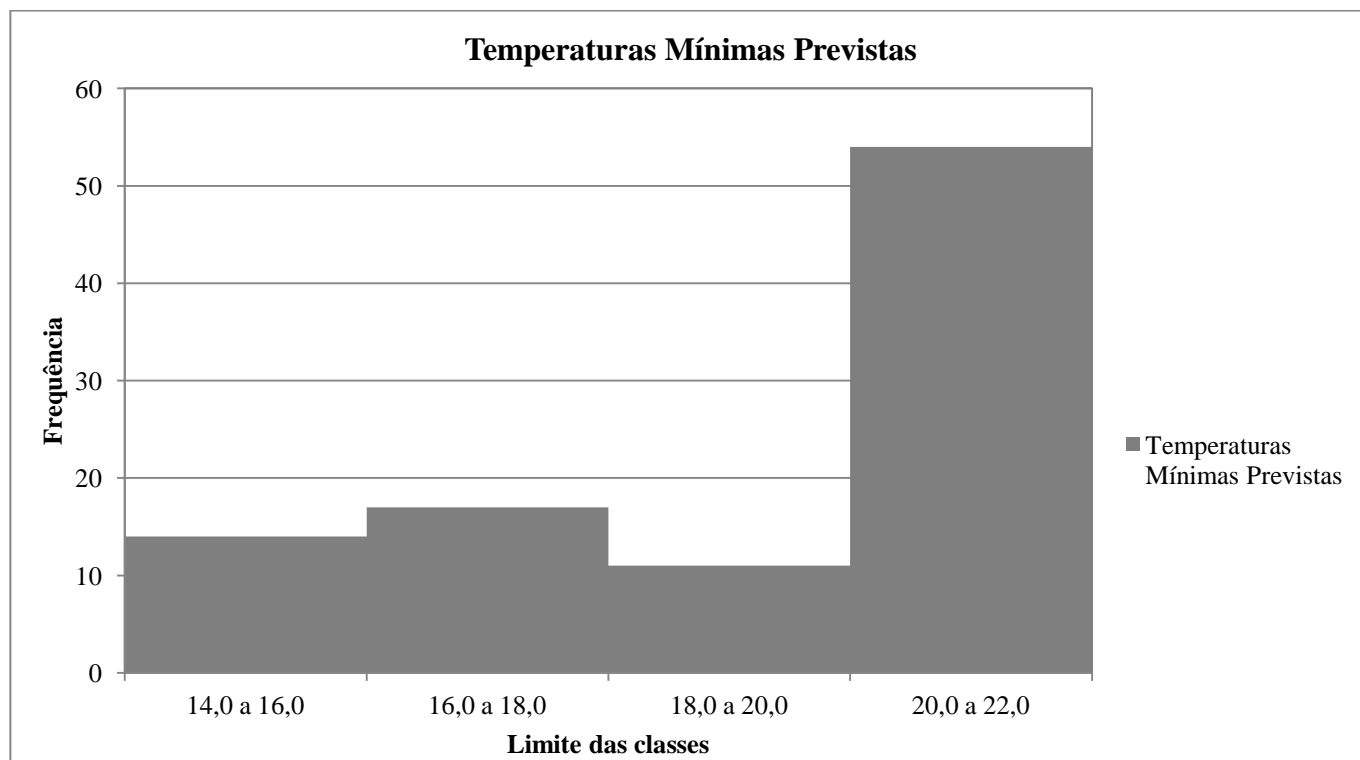
Tabela 31 - Classe e frequências das Temperaturas mínimas mensais previstas.

Distribuição de Frequências das Temperaturas Mínimas Previstas		
Limite das Classes	Frequência	
	Absoluta	Relativa
14,0 a 16,0	14	14,6%
16,0 a 18,0	17	17,7%
18,0 a 20,0	11	11,5%
20,0 a 22,0	54	56,3%
Soma	96	100,0%

Fonte: O autor.

A Tabela anterior apresenta uma mudança na frequência de ocorrência de temperaturas mínimas previstas quando comparada com a Tabela das temperaturas mínimas registradas pela estação do INMET. De fato, é possível notar que ocorre uma maior frequência concentrada na classe de temperaturas mínimas entre 20,0°C a 22,0°C. Este fato pode ser notado mais claramente observando a Figura 44 abaixo, que corresponde ao histograma de frequência das temperaturas mínimas previstas entre os anos de 2040 a 2047.

Figura 44 - Histograma das temperaturas mínimas mensais previstas.



Fonte: O autor

A Tabela 33 apresenta as classes e frequências para as temperaturas médias mensais previstas para os anos entre 2040 e 2047.

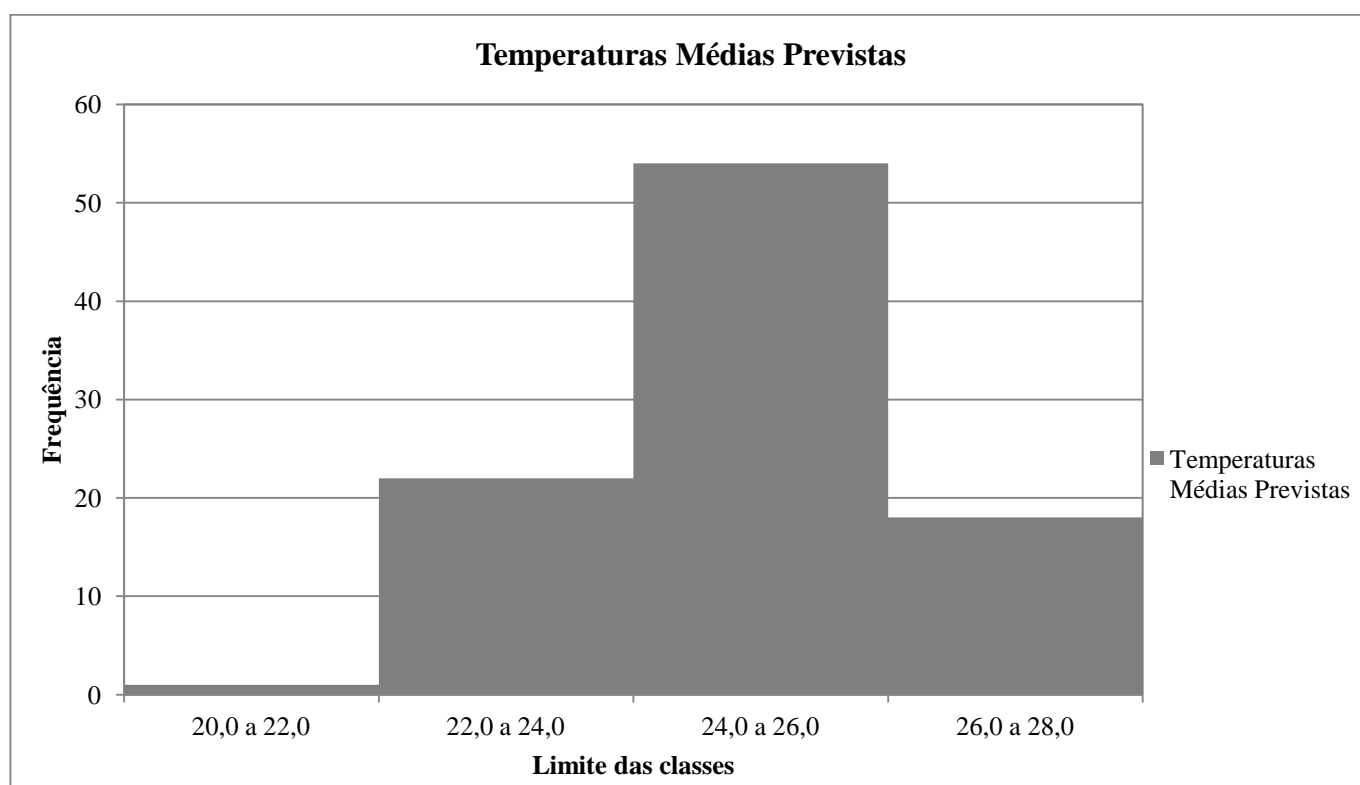
Tabela 32 - Classes e frequências das Temperaturas médias mensais previstas.

Distribuição de Frequências das Temperaturas Médias Previstas		
Limite das Classes	Frequência	
	Absoluta	Relativa
20,0 a 22,0	1	1,1%
22,0 a 24,0	22	23,2%
24,0 a 26,0	54	56,8%
26,0 a 28,0	18	18,9%
Soma	95	100,0%

Fonte: O autor.

Ao se comparar as Tabelas, que correspondem às distribuições de frequências das temperaturas médias da estação do INMET e previstas, respectivamente, podemos notar que a maior ocorrência nas médias da estação meteorológica se situa na classe de 23,0°C a 25,0°C e a classe de maior ocorrência nas temperaturas previstas está situada entre 24,0°C a 26,0°C, ou seja, entre os anos de 2040 a 2047 teremos a maior ocorrência de temperaturas médias com elevação de cerca de 1,0°C comparando com o período histórico da estação meteorológica. Este fato pode ser melhor entendido e visualizado por meio do histograma da Figura 45.

Figura 45 - Histograma das temperaturas médias mensais previstas.



Fonte: O autor

Para as temperaturas máximas mensais a previsão demonstra que as frequências descolam sua maior ocorrência para a classe de 31,0°C a 33,0°C se comparada à frequência de distribuição das temperaturas máximas da estação do INMET, onde a maior frequência ocorria entre as classes de 29,0°C a 31,0°C, se for observada a Tabela 34, que corresponde à distribuição das frequências das temperaturas máximas previstas para o período entre 2040 a 2047.

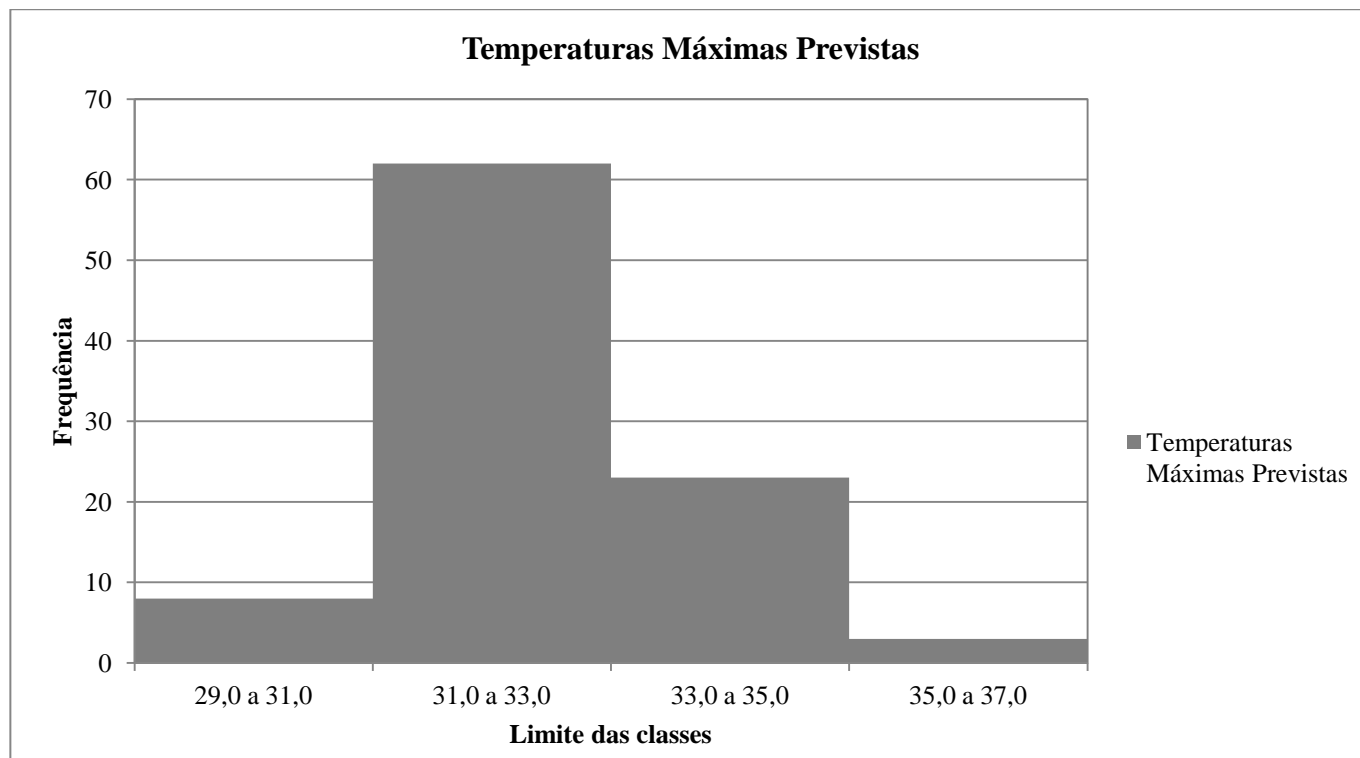
Tabela 33 - Classes e frequências das Temperaturas máximas mensais previstas.

Distribuição de Frequências das Temperaturas Máximas		
Limite das Classes	Frequência	
	Absoluta	Relativa
29,0 a 31,0	8	8,3%
31,0 a 33,0	62	64,6%
33,0 a 35,0	23	24,0%
35,0 a 37,0	3	3,1%
Soma	96	100,0%

Fonte: O autor.

Da mesma forma, uma análise do histograma da Figura 46, nos traz a percepção desta mudança nas temperaturas máximas mensais previstas que se elevam em cerca de 1,0°C em sua ocorrência.

Figura 46 - Histograma das temperaturas máximas mensais previstas.



Fonte: O autor

5.0 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi utilizado o Método de Suavização Exponencial de Holt-Winters para a previsão de temperaturas. O método se mostrou adequado para as estimativas de temperaturas mínimas, médias e máximas mensais. No entanto, um experimento executado com as mesmas temperaturas transformadas em médias anuais não apresentou a mesma consistência. Desta forma, podemos concluir que séries temporais com dados mensais terão melhor resultado com o presente método. Outro experimento foi executado utilizando o método aditivo de Holt-Winters, tanto para as temperaturas mensais quanto para as temperaturas anuais, gerando resultados aquém dos gerados pelo método multiplicativo utilizado neste capítulo. Para o método aditivo, observou-se que as previsões para o mesmo período, entre 2040 a 2047, geraram temperaturas mensais com valores próximos gerando um comportamento estatístico semelhante a uma média ponderada. Desta forma, os gráficos destas novas temperaturas computadas pelo método aditivo apresentaram um comportamento com tendências à normalização e quase linear. Fato que não retrata o comportamento sazonal apresentado pelos dados históricos mensais utilizados entre os anos de 1970 a 2015. De fato, analisando as temperaturas dos dados históricos podemos notar que a amplitude da variação sazonal aumenta com o decorrer do período o que justifica a escolha do método multiplicativo.

As temperaturas previstas reafirmam a expectativa do aumento das temperaturas mínimas, médias e máximas apresentadas pela análise dos dados históricos. Conforme demonstrado neste capítulo, além dos aumentos nas temperaturas mensais, a ocorrência destas se situará em classes mais altas, com cerca de 1,0°C mais quentes. Podemos notar que, também, após o ano 2000, todas as temperaturas se elevam de forma significativa, onde suas amplitudes entre as mínimas e máximas se situam em um patamar mais elevado que nos anos anteriores.

Para as temperaturas mínimas, por meio da análise dos dados históricos mensais, a maior ocorrência se situa na classe de 18,0°C a 20,0°C, apresentando uma frequência de 33,5%, seguida de uma segunda maior frequência de 28,5% para a classe de 20,0°C a 22,0°C. As temperaturas mínimas previstas apresentam sua maior ocorrência na classe de 20,0°C a 22,0°C com frequência de 56,3%. As temperaturas médias dos dados históricos apresentam maior ocorrência na classe de 23,0°C a 25,0°C

com frequência de 57,5% e as médias previstas com frequência de 56,8% para a classe de 24,0°C a 26,0°C. As máximas tem sua ocorrência concentrada na classe entre 29,0°C a 31,0°C com frequência de 52,2%. Para as máximas previstas a frequência sobe para 64,6% situada na classe de temperaturas entre 31,0°C a 33,0°C. Estes dados numéricos nos trazem a percepção de que além do aumento de cerca de 1,0°C nas classes de maior ocorrência, as temperaturas mais quentes ocorreram mais vezes entre os meses do período estimado para a previsão.

Torna-se provável que ocorra um aumento significativo das temperaturas mínimas, médias e máximas para os anos posteriores e que a frequência com que estas temperaturas mais altas ocorrerão serão mais significativas e concentradas.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABENHAIM, L., 2003: **Canicules - La santé publique en question**. Fayard. 267 pp.
- ARENDT R (1996) **Conservation design for subdivisions: A practical guide to creating open space networks**. Island Press, Washington, DC
- BHATTA, B. **Analysys of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data**. New York, US. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010.
- BIAS, E. de S.; BAPTISTA, G. M. de M.; LOMBARDO, M. **Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados LANDSAT e IKONOS**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. Anais...Belo Horizonte: INPE, 2003. P. 1741-1748. Disponível em <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14_005.pdf>. Acesso: 18 de junho de 2013.
- CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; OLIVEIRA, A, S de.; NOGUEIRA, M. C de. **J. A. Uso Do Solo e Temperatura Superficial em Área Urbana**. Mercator, Fortaleza, v.10, n. 23, p. 207-223, 2011. Disponível em:<www.mercator.ufc.br>. Acessado em: 05 de setembro de 2013.
- CALTHORPE, P.; VAN DER RYN, S. **Sustainable design: A new synthesis for cities, suburbs, and towns**. Sierra Club Books, San Francisco, CA. 1986.
- CHUDNOVSKY, A.; BEN-DOR, E.; SAARONI, H. **Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements**. *Energy Build* 36(11):1063–74. 2004. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804000854>>. Acessado em: 08 de setembro de 2013.
- COLL, C.; CASELLES, V.; GALVE, J. M.; VALOR, E.; NICLÒS, R.; SANCHEZ, J. M. **Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data**. *Remote Sensing of Environment*, 97, 288–300. 2005. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425705001562>>. Acessado em: 08 de setembro de 2013.
- COLL, C.; GALVE, J. M.; SANCHEZ, J. M.; CASELLES, V. **Validation of Landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 547–555. 2010. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5208377&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F36%2F5356243%2F05208377.pdf%3Farnumber%3D5208377>>. Acessado em: 02 de outubro de 2013.
- COLL, C.; CASELLES, V.; VALOR, E.; NICLÒS, R. **Comparison between different sources of atmospheric profiles for land surface temperature retrieval from single channel thermal infrared data**. *Remote Sensing of Environment*, 117, 199–210. 2012. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711003452>>. Acessado em: 02 de outubro de 2013.

COLL, C.; VALOR, E.; GALVE, J. M.; MIRA, M.; BISQUERT, M.; GARCÍA-SANTOS, V. **Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer**. *Remote Sensing of Environment*, 116, 211–225. 2012. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711002227>>. Acesso: 13 de junho de 2013.

CUNHA, J. E. de. B. L.; RUFINO, I. A. A.; IDEIÃO, S. M. A. **Determinação da temperatura de superfície na cidade de Campina Grande – PB a partir de imagens do satélite Landsat 5-TM**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. Anais...Natal: INPE, 2009. P. 5717-5724. Disponível em <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.22.51/doc/5717-5724.pdf>>. Acesso: 15 de junho de 2013.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. (Tese Doutorado em do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2007. Disponível em <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.12.18.38/doc/publicacao.pdf>>. Acesso: 08 de junho de 2013.

FRUMKIN, H. **Urban sprawl and public health**. *Public Health Reports*, 117, 201–217. Fujita, M., Krugman, P. and Venables, A.J. (1999). *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*, MIT Press, Cambridge, MA. 2002. Disponível em <http://www.cdc.gov/healthyplaces/articles/urban_sprawl_and_public_health_phr.pdf>. Acesso: 01 de março de 2013.

GUILLEVIC, P. C.; PRIVETTE, J. L.; COUDERT, B.; PALECKI, M. A.; DEMARTY, J.; OTTLÉ, C. **Land Surface Temperature product validation using NOAA's surface climate observation networks-Scaling methodology for the Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS)**. *Remote Sensing of Environment*, 124, 282–298. 2012. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002076>>. Acesso: 01 de março de 2013.

HOOK, S. J.; CLODIUS, W. B.; BALICK, L.; ALLEY, R. E.; ABTAHI, A.; RICHARDS, R. C. **In-flight validation of mid- and thermal infrared data from the Multispectral Thermal Imager (MTI) using an automated high-altitude validation site at Lake Tahoe CA/NV, USA**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 1991–1999. 2005. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1499015>>. Acesso: 02 de março de 2013.

HOOK, S. J.; PRATA, A. J.; ALLEY, R. E.; ABTAHI, A.; RICHARDS, R. C.; SCHLADOW, S. G. (2003). **Retrieval of lake bulk and skin-temperatures using Along Track Scanning Radiometer (ATSR) data: A case study using lake Tahoe, CA**. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 534–548. 2003. Disponível em <<http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520->

[0426%282003%2920%3C534%3AROLBAS%3E2.0.CO%3B2>](#). Acesso: 02 de março de 2013.

HOOK, S. J.; VAUGHAN, R. G.; TONOOKA, H.; SCHLADOW, S. G. **Absolute radiometric in-flight validation of mid infrared and thermal infrared data from ASTER and MODIS on the Terra spacecraft using the lake Tahoe, CA/NV, USA, Automated Validation Site.** IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 45, 1798–1807. 2007. Disponível em http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4231350&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4231350. Acesso: 03 de março de 2013.

HULLEY, G. C.; HOOK, S. J. **Intercomparison of versions 4, 4.1 and 5 of the MODIS Land Surface Temperature and Emissivity products and validation with laboratory measurements of sand samples from the Namib desert, Namibia.** Remote Sensing of Environment, 113, 1313–1318. 2009a. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425709000674>. Acesso: 21 de julho de 2013.

LEITE, M. R.; BRITO, J. L. S. **Avaliação de Desempenho entre Modelos de Obtenção de Temperatura da Superfície por Sensores Remotos.** OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia, v.4, n.12, p. 73-89, dez. 2012. Disponível em: <http://www.observatorium.ig.ufu.br/pdfs/4edicao/n12/04.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2014.

LI, J-j.; WANG, X-r.; WANG, X-j.; MA, W-c.; ZHANG, H. **Remote Sensing Evaluation of Urban Heat Island and its Spatial Pattern of The Shanghai Metropolitan Area, China.** Ecological Complexity, 6, p. 413-420, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1476945X0900018X>. Acessado em: 12 de novembro de 2013.

LILLESAND, M. T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** 5ª Edição. New Jersey, US. John Wiley & Sons, Inc. 2004.

LO, C. P.; QUATTROCHI, D. A.; LUVALL, J. C. **Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect.** International Journal of Remote Sensing 18(2):287–304. 1997. Disponível em: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19970022564.pdf>. Acessado em: 11 de novembro de 2013.

NICLÒS, R.; GALVE, J. M.; VALIENTE, J. A.; ESTRELA, M. J.; COLL, C. **Accuracy assessment of land surface temperature retrievals from MSG2-SEVIRI data.** Remote Sensing of Environment, 2126–2140. 2011. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/251494319_Accuracy_assessment_of_land_surface_temperature_retrievals_from_MSG2-SEVIRI_data. Acessado em: 09 de novembro de 2013.

OKE, T. R. **Urban climates and global environmental change.** In: Thompson RD, Perry AH (eds) Applied climatology: Principles and practice. Rutledge Publishers, New York, NY, pp 273-288. 1997.

PRATA, A. J. **Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms.** Journal of Geophysical Research, 99, 13025–13013,13058. 1994b. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/94JD00409/abstract>>. Acessado em: 09 de novembro de 2013.

PIJAWKA K.D.; SHETTER, K. **The environment comes home: Arizona Public Service environmental show case home.** Herberger Center for Design Excellence, Arizona State University, Tempe, AZ. 1995.

SABOL, D. E.; GILLESPIE, A. R.; ABBOTT, E.; YAMADA, G. **Field validation of the ASTER Temperature-Emissivity Separation algorithm.** Remote Sensing of Environment, 113, 2328–2344. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425709001898>>. Acessado em: 22 de abril de 2013.

SAWABE, Y.; MATSUNAGA, T.; ROKUGAWA, S.; HOYANO, A. **Temperature and emissivity separation for multi-band radiometer and validation ASTER TES algorithm.** Journal of Remote Sensing Society of Japan, 23, 364–375. 2003. Disponível em: <http://astp.jst.go.jp/modules/search/index.php?page=DocumentDetail&journalId=0289-7911_23_4_Temperature+and+Emissivity+Separation+for+Multi-band+Radiometer+and+Validation+ASTER+TES+Algorithm_N%2FA>. Acessado em: 03 de abril de 2013.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; BALICK, L.; GILLESPIE, A. R.; SABOL, D. A.; GUSTAFSON, W. T. **Accuracy of ASTER level-2 thermal-infrared standard products of an agricultural area in Spain.** Remote Sensing of Environment, 106, 146–153. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442570600318X>>. Acessado em: 22 de abril de 2013.

SOBRINO, J. A.; ROMAGUERA, M. **Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data.** Remote Sensing of Environment, 92, 247–254. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704001889>>. Acessado em: 28 de abril de 2013.

SÒRIA, G.; SOBRINO, J. A. **ENVISAT/AATSR derived land surface temperature over a heterogeneous region.** Remote Sensing of Environment, 111, 409–422. (2007). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425707001484>>. Acessado em: 27 de abril de 2013.

SOUZA, S.B de.; JÚNIOR, L. G. F. **Relação entre Temperatura de Superfície Terrestre, Índices Espectrais e Classes de Cobertura da Terra no Município de Goiânia (GO).** RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise, 26, 2012, p.75-99. Curitiba. Departamento de Geografia. UFPR. Disponível em

<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/raega/article/view/30151>. Acesso: 12 de janeiro de 2014.

SNYDER, W. C.; WAN, Z.; ZHANG, Y.; FENG, Y. Z. **Requirements for satellite land surface temperature validation using a silt playa**. *Remote Sensing of Environment*, 61, 279–289. 1997. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425797000448>>. Acesso: 15 de maio de 2013.

SOUZA, S. B de.; ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G. **Paisagens heterogêneas e temperaturas superficiais em ambiente pantaneiro**. In...Anais 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Bonito, MS, 20-24 de outubro de 2012. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 81-90.

STEINER, F. **The living landscape: An ecological approach to landscape planning**. McGraw-Hill, New York, NY. 2000.

THAYER, R. L Jr. **Gray world, green heart: Technology, nature, and the sustainable landscape**. John Wiley and Sons, New York, NY. 1994.

THOMPSON, J. W.; SORVIG, K. **Sustainable landscape construction: A guide to green building outdoors**. Island Press, Washington, DC. 2000.

TRIGO, I. F.; MONTEIRO, I. T.; OLESEN, F.; KABSCH, E. **An assessment of remotely sensed land surface temperature**. *Journal of Geophysical Research*, 113, D17108. 2008. Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JD010035/abstract>>. Acesso: 15 de setembro de 2013.

TRIGO, I. F.; PERES, L. F.; DACAMARA, C. C.; FREITAS, S. C. **Thermal land surface emissivity retrieved from SEVIRI/Meteosat**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 307–315. 2008. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4407743&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F36%2F4432701%2F04407743.pdf%3Farnumber%3D4407743>>. Acesso: 02 de setembro de 2013.

WAN, Z. **New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products**. *Remote Sensing of Environment*, 112, 59–74. 2008. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425707003665>>. Acesso: 02 de agosto de 2013.

WAN, Z.; LI, Z.-L. **Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product**. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5373–5395. 2008. Disponível em <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160802036565#preview>>. Acesso: 02 de agosto de 2013.

WAN, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, Z.-L. **Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging**

Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 163–180. 2002. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000937>. Acesso: 02 de agosto de 2013.

WAN, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, Z.-L. **Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature.** *International Journal of Remote Sensing*, 25, 261–274. 2004. Disponível em <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116031000116417?journalCode=trrs20#preview>. Acesso: 01 de agosto de 2013.

WANG, K.; LIANG, S. **Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites.** *Remote Sensing of Environment*, 113, 1556–1565. 2009. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00344257/113/10>. Acesso: 01 de agosto de 2013.

WANG, W.; ZHU, L.; WANG, R.; SHI, Y. **Analysis on the spatial distribution variation characteristic of urban heat environmental quality and its mechanism—a case study of Hangzhou city.** *Chinese Geographical Science*, 13(1), 39–47. 2003. Disponível em <http://link.springer.com/article/10.1007/s11769-003-0083-7>. Acesso: 07 de julho de 2013.

WENG, Q. **A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China.** *International Journal of Remote Sensing* 22:1999–2014. 2001. Disponível em <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/713860788?journalCode=trrs20#preview>. Acesso: 07 de julho de 2013.

WENG, Q. **Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect.** *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69:555–66. 2003. Disponível em <http://isu.indstate.edu/qweng/PERS03Weng.pdf>. Acesso: 02 de julho de 2013.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. **Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies.** *Remote Sensing of Environment* 89:467–83. 2004. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425703003390>. Acesso: 12 de julho de 2013.

WENG, Q.; LIU, H.; LU, D. **Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States.** *Urban Ecosystem*, 10, 203–219. 2007. Disponível em <http://isu.indstate.edu/qweng/ue2007.pdf>. Acesso: 12 de julho de 2013.

WENG, Q. **Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends.** *ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing* 64(4):335–44. 2009. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427160900046X>. Acesso: 14 de outubro de 2013.

