

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/4, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais: 837-855
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

UTILIZAÇÃO DO INFRAVERMELHO TERMAL NA ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E ILHAS DE CALOR URBANAS

*Usage of Thermal Infrared Sensing in the Spatio-Temporal Analysis of Surface
Temperature and Urban Heat Islands*

**Patrícia Michele Pereira Trindade¹, Dejanira Luderitz Saldanha¹
& Waterloo Pereira Filho²**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP: 90501-970, Porto Alegre - RS, Brasil
patriciatrindade.sr@gmail.com,dejanira.saldanha@ufrgs.br

²Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Av. Roraima, 1000 - CEP: 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil
waterloopf@gmail.com

Recebido em 17 de Fevereiro, 2017/ Aceito em 29 de Abril, 2017
Received on February 17, 2017/ Accepted on April 29, 2017

RESUMO

Diante do cenário atual de expansão urbana cada vez mais crescente, surgem inúmeras preocupações sobre os diversos impactos que a substituição do meio natural por áreas construídas pode acarretar. Um dos assuntos mais discutidos na atualidade é a questão do aquecimento global. Assim, a comunidade científica lança mão das mais variadas técnicas para estudar o ambiente urbano. Os dados captados por sensoriamento remoto na região do infravermelho termal possibilitam a realização de estudos da temperatura de diferentes coberturas da terra. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar as variações na temperatura de superfície e existência de ilhas de calor urbanas na cidade de Santa Maria- RS, considerando um período de vinte anos. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite dos sensores TM a bordo do satélite Landsat 5 e OLI e TIRS do satélite Landsat 8. O critério para seleção das imagens foi a ausência de nuvens e ruídos que pudessem comprometer as análises. Assim, realizou-se uma análise de uma série temporal considerando as quatro estações do ano para o período de 1994 a 2014. Os procedimentos metodológicos seguiram basicamente três etapas. Primeiramente, foram realizadas classificações supervisionadas a partir do algoritmo *MaxVer*, para estabelecer a expansão urbana da área de estudo. No segundo momento, as imagens de temperatura aparente foram convertidas para temperatura de superfície pela ferramenta *Land Surface Temperature* (LST) disponível no *software QGIS*. A terceira etapa consistiu em estabelecer uma metodologia que possibilitasse a identificação de ilhas de calor urbanas em todas as estações do ano. Assim, realizou-se a subtração da temperatura média de cada imagem com auxílio da ferramenta *band math* do *Envi*. Desta forma, foi possível verificar a diferença entre a temperatura de cada pixel e a temperatura média de sua respectiva imagem. Todas as análises das imagens foram acompanhadas com a verificação das condições meteorológicas da cidade a partir dos dados disponíveis na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir da análise dos dados foi possível constatar aumento das áreas com temperaturas de superfície mais elevadas, o que pode ser justificado pelo incremento das áreas construídas na cidade, já que a taxa de

crescimento de 1994 para 2014 foi de 70%. As ilhas de calor urbanas foram identificadas em todas as estações, porém as de maior intensidade (6°C superiores à média), foram encontradas nas imagens do verão e primavera. Um dos principais resultados alcançados foi a identificação de áreas com temperaturas mais elevadas, como as regiões leste, centro e oeste da cidade. As áreas vegetadas apresentaram temperaturas mais brandas, assim se caracterizaram como possível solução para amenizar regiões muito quentes. Sendo que, por mais que as imagens utilizadas sejam de média resolução espacial elas são empregadas em diversos estudos urbanos, como é o caso da presente pesquisa, pois além da distribuição ser gratuita as imagens Landsat possuem um grande acervo histórico e atualmente apresenta resolução temporal de 16 dias. Neste sentido, conclui-se que os produtos e as técnicas de sensoriamento remoto permitiram a geração de informações que podem ser usadas por gestores públicos no planejamento territorial e assim mitigar os problemas urbanos.

Palavras-chave: Área Urbana, Ilha de Calor, Sensoriamento Remoto, Imagens de Satélite.

ABSTRACT

Given the contemporary landscape of ever-growing urban expansion, countless concerns show up in regard to the diverse impacts that the substitution of the natural environment for constructed surfaces can bring about. One of the subjects most discussed nowadays is the question of global warming. Thus, the scientific community resorts to varied techniques in order to study the urban environment. The data obtained by remote sensing from the thermal infrared region allows for the undertaking of studies of temperature on different surfaces of the earth. In this context, the objective of this research was to analyze the variations in surface temperature and the existence of urban heat islands in the city of Santa Maria, RS, Brazil, considering a span of twenty years. For this purpose, satellite images from the TM sensors aboard the Landsat 5 satellite and from the OLI and TIRS sensors of the Landsat 8 satellite were used. The criterion for the selection of images was the absence of clouds and noise that could compromise the analyses. Thus, a time series analysis considering the four seasons of the year during the period from 1994 to 2014 was performed. The methodological proceedings followed three steps. Firstly, classifications supervised by the MaxVer algorithm were performed in order to establish the urban expansion of the study area. Secondly, the images of apparent temperature were converted to surface temperature with the help of the Land Surface Temperature (LST) tool, available in the software QGIS. Thirdly, a methodology was established that could enable the identification of urban heat islands throughout all the seasons of the year. Thus, the average temperature was subtracted from each image with the help of the band math tool in Envi. In this way, the difference between the temperature of each pixel and the average temperature of its respective image could be verified. All the image analyses were accompanied by the verification of the meteorological conditions of the city through the data available in the meteorological station of the National Institute of Meteorology (*Instituto Nacional de Meteorologia; INMET*). From the data analysis, the increase of areas with more elevated surface temperature could be verified, which can be justified by the development of constructed areas in the city, since the growth rate from 1994 to 2014 was 70%. The urban heat islands were identified throughout all the seasons, however, the ones with the most intensity (6°C, or 10, 8 °F, above average) were found in the images of summer and spring. One of the main results achieved was the identification of areas with more elevated temperatures, such as the eastern, central and western regions of the city. The vegetated areas showed milder temperature, thus they were characterized as possible solutions for the cooling of hotter regions. Despite being of low spatial resolution, the images used can be employed in a variety of urban studies, as is the case with the present research, because beyond their free distribution, the Landsat images have an ample historical collection, and currently present a temporal resolution of 16 days. In conclusion, the products and techniques of Remote Sensing allow for the generation of information can be used by public managers in territorial planning and, thus, mitigate urban problems.

Keywords: Urban Area, Heat Islands, Remote Sensing, Satellite Images.

1. INTRODUÇÃO

Em 1985, já era constatado que os municípios brasileiros assistiam um crescente processo de urbanização com a concentração de pessoas em áreas urbanas, conforme trabalho realizado por Lombardo (1985). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

(IBGE), o censo demográfico de 2010 constatou que 84% da população brasileira reside em áreas urbanas. A transformação do meio natural em ambiente urbanizado contribui para a artificialização do espaço bem como mudanças na qualidade ambiental. Conforme Ortiz e Amorim (2011), a falta de planejamento urbano

acaba contribuindo para problemas ambientais nas cidades a partir das mudanças na atmosfera local com a poluição do ar e aumento das temperaturas.

Dentre os impactos gerados a partir da ocupação desordenada do espaço urbano pode-se citar as alterações no clima urbano. A substituição da cobertura natural pelo incremento de área edificada contribui para o aumento da temperatura do ar e de superfície em relação ao seu ambiente circunvizinho não urbanizado. Assim, surge o fenômeno denominado “ilha de calor urbana” caracterizado pelo elevado aquecimento térmico das cidades, principalmente áreas centrais, em comparação aos ambientes naturais ou rurais. O fenômeno é formado nessas áreas porque os materiais de construção absorvem e retêm mais radiação solar do que áreas naturais (OKE, 1973; GARTLAND, 2010).

Segundo Nucci (2008) e Chen *et al.* (2006), uma das principais consequências das ilhas de calor é a modificação da circulação atmosférica local e como resultado observa-se maior concentração de poluentes em seu interior bem como temperaturas mais elevadas. Estudos como de Silva *et al.* (2014) apontam que as ilhas de calor urbanas proporcionam o desconforto térmico e podem ser responsáveis pelo agravamento de problemas respiratórios e cardiovasculares.

Diante disto, cabe destacar que a qualidade do ambiente urbano é um importante campo de pesquisa, sendo que cabem aos pesquisadores o desenvolvimento de trabalhos que busquem identificar os problemas nos mais variados espaços urbanos para que, de alguma forma, se possa mitigar os problemas existentes e prevenir os futuros. Neste contexto, apresenta-se o objetivo deste trabalho que foi analisar as variações na temperatura de superfície e existência de ilhas de calor urbanas na cidade de Santa Maria (RS) considerando o período de 1994 a 2014.

Gartland (2010) destaca alguns métodos para medir os efeitos da urbanização no clima urbano, dentre eles estão: Estações fixas; Transectos móveis e sensoriamento remoto. Os dois primeiros métodos são utilizados para monitorar a temperatura do ar. Já o Sensoriamento Remoto pode ser utilizado para verificar outras características do meio urbano, como tipos de

cobertura e temperatura de superfície a partir de imagens de satélite do espectro refletido e do emitido. A autora ainda destaca que a vantagem de utilizar o sensoriamento remoto é a possibilidade de visualizar as temperaturas em grandes áreas. Na presente pesquisa serão utilizados dados de sensoriamento remoto para analisar as características termais da área de estudo.

Mudanças no uso e cobertura da terra, expansão urbana e temperatura de superfície podem ser analisados a partir das imagens de satélites. Com o processamento digital de imagens é possível identificar ilhas de calor urbanas através de produtos que compreendem a faixa do infravermelho termal. O estudo de áreas urbanas a partir de imagens do infravermelho termal foi realizado pela primeira vez por Rao em 1972 (CHEN *et al.*, 2006). No Brasil, o estudo pioneiro foi o de Lombardo (1985), o qual foi considerado como impulsionador desta linha de análise no país. A autora mostrou a ocorrência de ilha de calor na cidade de São Paulo, e identificou diferenças de até 10°C comparando áreas construídas e áreas com cobertura vegetal.

Albert *et al.* (2004) destacam que o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa para o monitoramento das mudanças no espaço urbano. Os autores falam também da gama de dados de média resolução da plataforma Landsat 5 (TM) os quais podem ser utilizados em ciências exatas e sociais para a quantificação da paisagem urbana. No entanto, Small (2002) alerta para a dificuldade de trabalhar com áreas urbanas utilizando imagens de média resolução espacial, isto se deve a heterogeneidade das superfícies urbanas (concreto, asfalto, árvores, telhas, metal, dentre outros). Para tanto, diversas técnicas e estudos foram desenvolvidos para melhorar a precisão na caracterização dos tipos de cobertura da terra no espaço urbano, como por exemplo classificação híbrida (ALBERT *et al.*, 2004), análise de pixel mistura (SMALL, 2002; MICHISHITA, 2012), redes neurais artificiais (KÍNOVÁ, 2015), e índices radiométricos para áreas construídas (ZHA, 2003; XU, 2007).

Ao considerar a resposta espectral de áreas urbanas no espectro emitido pode-se trabalhar com dados do infravermelho termal para determinar as variações das temperaturas nessas áreas. Diversos

trabalhos nesta abordagem podem ser citados como: Chen *et al.* (2006) realizaram uma análise da relação entre ilhas de calor urbanas e as mudanças no uso e cobertura do espaço urbano; Liu e Zhang (2011) analisaram ilhas de calor urbanas a partir de dados Landsat e Aster; Deng e Wu (2013) que analisaram os impactos das composições biofísicas urbanas em ilhas de calor urbanas utilizando dados da plataforma Landsat 7 (ETM+).

Trabalhos no Brasil também podem ser citados: Costa *et al.* (2010) utilizaram imagens do infravermelho termal para identificar ilhas de calor na área urbana da Ilha de Solteira – SP; Lima e Amorim (2011) utilizaram dados do infravermelho termal, NDVI e dados de campos para realizar uma análise da qualidade ambiental urbana em Nova Andradina – MS; Barros e Lombardo (2013) realizaram o zoneamento climático urbano de Recife a partir de dados da plataforma Landsat 5 (TM).

Quattrochi e Ridd (1994) ao analisar diferentes cidades com sistemas termais de alta resolução identificaram diferenças nas temperaturas nos variados usos do solo urbano. Os autores verificaram que as áreas comerciais apresentavam temperaturas mais altas, em seguida as áreas de serviços, transportes e indústria. As menores temperaturas foram encontradas na vegetação, água e terras agrícolas, já as áreas residenciais apresentaram temperaturas intermediárias.

Segundo Ortiz e Amorim (2011) a partir da elaboração de mapas de temperatura de superfície é possível verificar quais são os locais da cidade que merecem atenção por parte dos gestores públicos. É importante destacar que tanto os dados como *softwares* de processamento apresentaram grandes avanços nos últimos anos o que facilitou ainda mais a utilização do sensoriamento remoto em diversas áreas e diferentes análises.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para este estudo foi a cidade de Santa Maria localizada no município de mesmo nome no centro do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). O município, conforme dados do IBGE, é o quinto mais populoso do Estado, sendo que a maioria da população reside em área urbana.

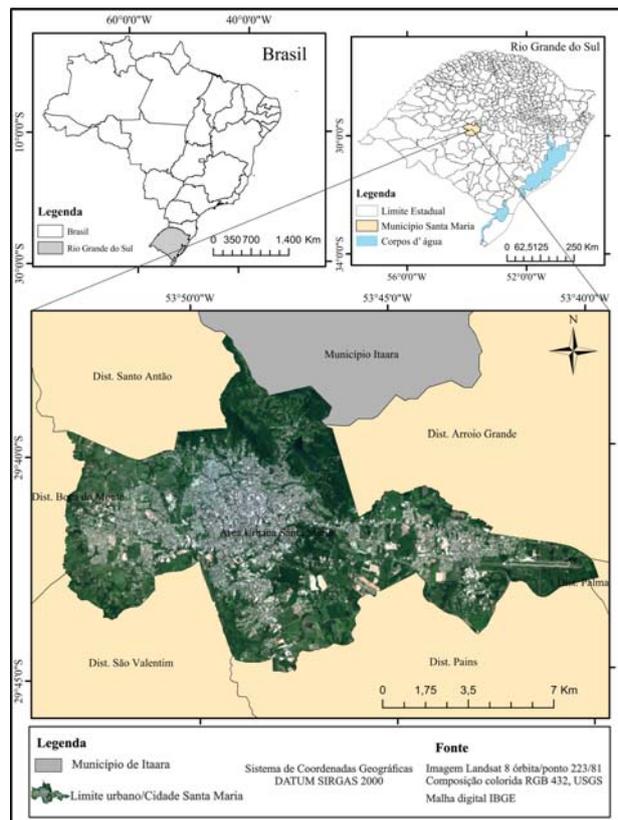


Fig. 1 - Localização Santa Maria, RS.

Geomorfologicamente o município no qual a cidade está inserida apresenta três unidades diferentes, a saber: 1ª Serra Geral situada ao norte abrangendo as maiores altitudes com uma topografia ondulada, resultante do vulcanismo fissural que ocorreu na Bacia do Paraná durante a Era Mesozoica; 2ª Rebordo do Planalto é a transição entre o Planalto e a Depressão Periférica, caracterizado por escarpas, vales e encostas íngremes, resultante da superposição dos sucessivos derrames de lava; 3ª Depressão Periférica, na qual a maior parte de Santa Maria se encontra, é caracterizada por colinas côncavas e convexas, as coxilhas, e as planícies aluviais constituídas por sedimentos recentes depositados pelos rios e arroios locais (IBGE, 1986; SARTORI, 2009).

Segundo a classificação climática de Köppen a cidade apresenta clima do tipo Cfa, o que significa ser um clima subtropical, caracterizando estações do ano bem definidas (KOTTEK *et al.*, 2006). A precipitação é significativa em todos os meses do ano e verões quentes. Segundo a classificação climática de Rossato (2011) para o estado do Rio Grande do Sul, a cidade apresenta um clima do tipo Subtropical II caracterizado por ser

mediamente úmido e com variação longitudinal das temperaturas médias. O volume médio de precipitação mensal gira em torno de 115 a 155 mm. A temperatura média anual é de 17-20°C. Segundo Sartori (2000), a cidade é uma das mais quentes do estado do Rio Grande do Sul devido ao efeito de continentalidade e baixa altitude onde está inserida.

De acordo com dados do IBGE (2010), a população do município de Santa Maria somava aproximadamente 217 mil habitantes em 1991 e em 2010, aproximadamente, 270 mil (Figura 2). A população urbana de Santa Maria apresentou um aumento de 26% de 1991 a 2010. Sendo que, em 1991, 2000 e 2010 a população urbana representava 90%, 94% e 95%, respectivamente, do total de habitantes do município.

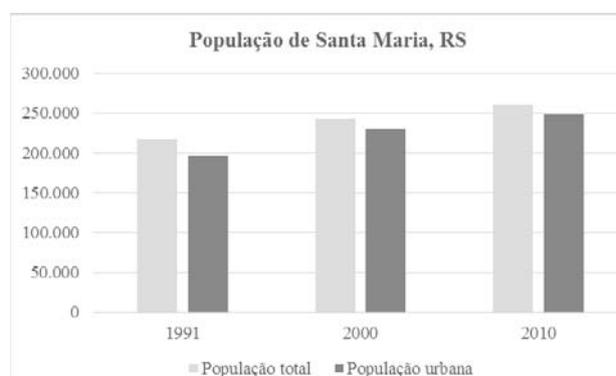


Fig. 2 – População de Santa Maria.

De acordo com a Agência de Desenvolvimento de Santa Maria, o fluxo monetário da cidade depende fundamentalmente do serviço público. A cidade destaca-se na região, no estado e no país como cidade portadora das seguintes funções em relação à prestação de serviços: comercial, educacional, médico hospitalar, rodoviário e militar (ADESM, 2017). A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e as Unidades Militares compõem os serviços públicos federais existentes na cidade. Além da UFSM, as instituições particulares de ensino também contribuem para a economia do município como um todo, além de movimentar um grande número de pessoas vindas de outras regiões do Estado.

Diante do exposto, cabe destacar que a escolha por esta área de estudo foi motivada devido a sua importância no sistema urbano do estado, suas características do sítio urbano, bem como por ser considerada uma das cidades mais quentes do Estado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo correspondeu à aquisição dos materiais utilizados e desenvolvimento dos procedimentos metodológicos delineados em cada etapa da pesquisa.

3.1 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados meteorológicos registrados próximo ao horário da passagem do satélite Landsat e imagens de satélite dos sensores TM, OLI, e TIRS.

3.1.1 Dados orbitais

Os dados orbitais utilizados foram:

- Oito cenas do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat 5, com resolução espacial de 30 metros (bandas 2, 3, 4, 6 e 7), órbita ponto 223/81.
- Quatro cenas do Sensor OLI (*Operational Land Imager*) do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros (bandas 3, 4, 5, 7), órbita ponto 223/81.
- Quatro cenas do sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros (banda 10), órbita ponto 223/81.

As imagens foram selecionadas em datas que representassem as quatro estações do ano para um período de 1994 a 2014, conforme a disponibilidade de imagens sem nuvens. A análise temporal contou com 12 imagens adquiridas gratuitamente no portal earthexplorer da USGS (*United States Geological Survey*) (Tabela 1). As bandas referentes ao espectro refletido (verde, vermelho, infravermelho próximo e médio) foram adquiridas em reflectância de superfície. As bandas referentes ao espectro emitido (infravermelho termal) foram adquiridas em temperatura de brilho ou aparente. Cabe destacar que, as imagens do infravermelho termal foram disponibilizadas pela USGS reamostradas para uma resolução de 30 metros.

O processamento digital das imagens foi realizado nos softwares *Envi 5.3* e *QGIS 2.12*. Após todos os processamentos, as imagens foram recortadas considerando o polígono no formato *shapefile* do limite da cidade de Santa Maria disponibilizado pelo IBGE.

Tabela 1: Imagens de satélite

| Imagem | Data | Hora/UTC | Sensor |
|-----------|------------|----------|----------|
| Verão | 12/01/1994 | 12:52:30 | TM |
| Verão | 26/01/2005 | 13:17:20 | TM |
| Verão | 19/01/2014 | 13:32:13 | OLI/TIRS |
| Outono | 07/04/1996 | 12:39:53 | TM |
| Outono | 22/04/2007 | 13:25:49 | TM |
| Outono | 22/04/2013 | 13:32:51 | OLI/TIRS |
| Inverno | 29/08/1996 | 12:47:52 | TM |
| Inverno | 28/08/2007 | 13:24:18 | TM |
| Inverno | 28/08/2013 | 13:33:07 | OLI/TIRS |
| Primavera | 23/11/1998 | 13:10:06 | TM |
| Primavera | 26/11/2005 | 13:19:43 | TM |
| Primavera | 16/11/2013 | 13:32:45 | OLI/TIRS |

3.1.2 Dados meteorológicos

Para dar suporte à interpretação e análise das imagens de temperatura foram adquiridos dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e velocidade do vento) a partir do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que possui uma estação na Universidade Federal de Santa Maria.

Para os dados de precipitação foram considerados os registros de dados de 1, 10 e 30 dias antes de cada imagem. Já dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento foram considerados os horários próximos a passagem do satélite pela cidade. Todos os dados foram organizados em gráficos para melhor análise e compreensão (Figura 3).

3.2 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos seguiram sete processos que podem ser visualizados na Figura 4.

3.2.1 Cálculo dos índices radiométricos

Com o intuito de escolher a composição colorida que apresentasse melhor contraste entre os diferentes alvos na imagem foi realizada uma composição utilizada por França *et al.* (2012), a qual considerou a associação de índices radiométricos aos canais RGB. A seguir estão descritos os três índices utilizados.

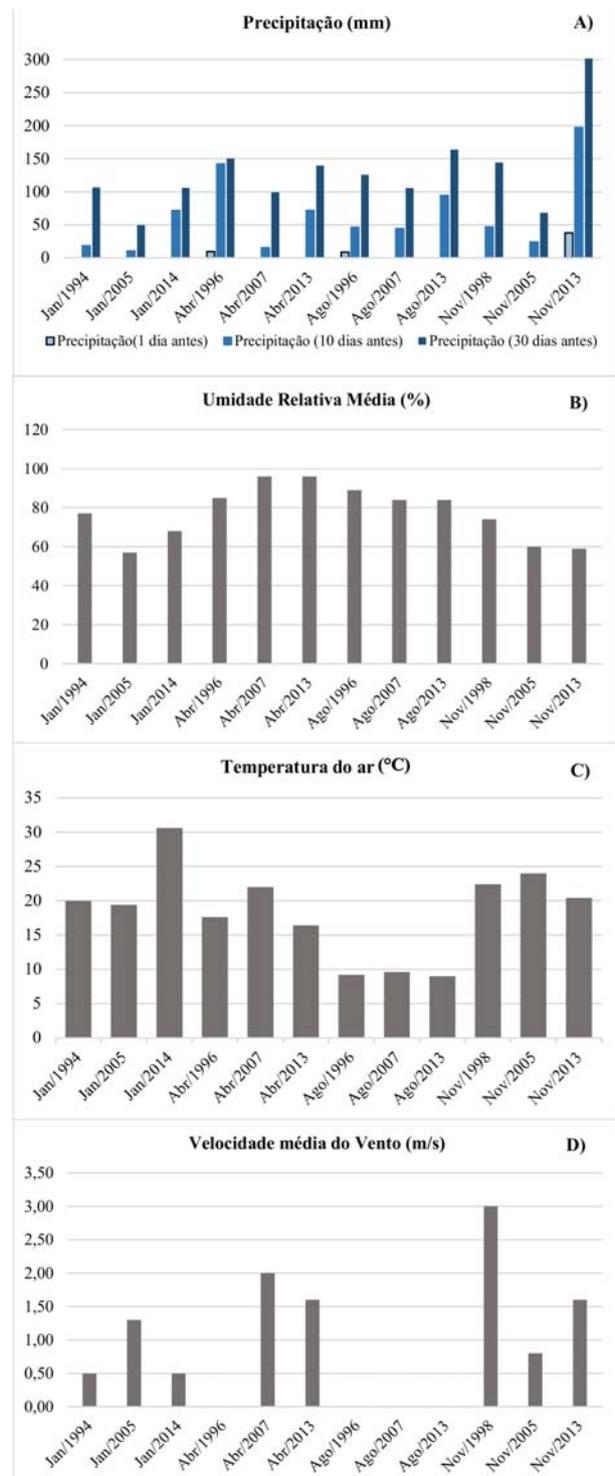


Fig. 3 - Dados meteorológicos A) Precipitação; B) Umidade do ar; C) Temperatura do ar; D) Velocidade do vento.



Fig. 4 - Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.

De acordo com França *et al.* (2012), a partir de índices radiométricos é possível identificar e realçar nas imagens determinados tipos de informações, como áreas edificadas, vegetação, corpos d'água, além de que a normalização pode contribuir para a redução de ruídos e efeitos de iluminação. Ao gerar cada índice, a imagem passa a apresentar novos valores, os quais estão no intervalo de -1 a +1. Nesse estudo foram calculados os índices radiométricos: para áreas construídas *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), Equação 1; para vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), Equação 2; e para água *Normalized Difference Water Index* (NDWI), Equação 3 utilizados por Zha (2003) e Xu (2007).

$$NDBI = \frac{\rho_{ivm} - \rho_{ivp}}{\rho_{ivm} + \rho_{ivp}} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (2)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{ivd} - \rho_{ivp}}{\rho_{ivd} + \rho_{ivp}} \quad (3)$$

onde, ρ_{ivm} = reflectância no infravermelho médio, ρ_{ivp} = reflectância no infravermelho próximo, ρ_{vm} = reflectância no vermelho, e ρ_{vd} = reflectância no verde.

Assim foi realizada a composição com os índices radiométricos descritos anteriormente.

Onde o NDBI, NDVI e NDWI foram associados aos canais RGB respectivamente.

3.2.2 Classificação supervisionada

A classificação de imagens correspondeu a determinação de diferentes coberturas da terra para área de estudo. Esta etapa serviu para verificar a expansão urbana de 1994 até 2014. A classificação foi realizada a partir do algoritmo *Máxima Verossimilhança* (*MaxVer*) com limiar de aceitação de 100%, sendo que este foi escolhido porque apresentou melhor desempenho neste trabalho. O classificador *MaxVer* considera a ponderação das distâncias entre as médias dos pixels das classes, sendo que assume que todas as bandas apresentam uma distribuição normal e calcula a probabilidade de um pixel pertencer a uma certa classe (RICHARDS, 1993; SCHOTT, 1997).

Assim, realizou-se uma análise visual nas imagens (composição colorida NDBI-R, NDVI-G, NDWI-B) para estabelecer as classes de cobertura presentes em cada uma. Com isto, foram estabelecidas cinco classes de cobertura: vegetação (áreas de cobertura vegetal mais densa); solo exposto (áreas sem cobertura vegetal); campo (áreas com gramíneas); água (reservatórios e açudes); e urbano (áreas construídas).

Após a definição das classes temáticas foram coletadas, em média, 20 amostras de treinamento para cada classe. Com a imagem já classificada realizou-se a edição matricial por meio de análise visual, a fim de corrigir áreas classificadas erroneamente pelo classificador.

Para analisar a exatidão das classificações foi utilizado o índice de concordância *Kappa*. O índice *Kappa* foi introduzido no sensoriamento remoto por Congalton, sendo que desde 1981 é amplamente utilizado por estudos da área (CONGALTON e GREEN, 2009). Para tanto, utilizou-se o índice *Kappa* para avaliar a concordância das amostras coletadas na fase de treinamento. As imagens disponíveis no *Google Earth* também serviram como apoio para verificar a concordância das classificações. Assim, considerou-se a os limiares de referência apresentados por Landis e Koch (1977), conforme a tabela 2.

Tabela 2: Qualidade da classificação Índice Kappa

| Valor Kappa | Qualidade da classificação |
|-------------|----------------------------|
| < 0 | Péssima |
| 0 a 0,2 | Ruim |
| 0,2 a 0,4 | Razoável |
| 0,4 a 0,6 | Boa |
| 0,6 a 0,8 | Muito Boa |
| 0,8 a 1 | Excelente |

Fonte: Landis e Koch (1977).

3.2.3 Obtenção de temperatura de superfície

Para o cálculo da temperatura de superfície foram utilizadas as bandas 6 do Landsat 5 TM e 10 Landsat 8 TIRS. Normalmente, para se obter temperatura de superfície é necessário primeiramente converter os valores digitais das imagens para temperatura aparente ou de brilho e posteriormente realizar correções atmosféricas e da emissividade na imagem. Como já é possível obter as imagens de temperatura de brilho diretamente da USGS, a conversão não foi necessária.

Os procedimentos para cálculo de temperatura de superfície foram realizados no complemento *Land Surface Temperature* (LST) desenvolvido por Ndossi e Avdan (2016) disponível no *software QGIS*. Então, para a estimativa da temperatura de superfície considerou-se a correção apenas da emissividade, conforme a equação 4.

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{a}\right) * \ln \varepsilon} \quad (4)$$

T_b = temperatura de brilho ou aparente registrada pelo sensor em Kelvin;

λ = comprimento de onda médio do infravermelho termal;

a = hc/K = 1.438 x 10⁻² m K, onde:

K = constante de Stefan-Boltzman (1.38 x 10⁻²³ J/K)

h = constante de Planck (6.28 x 10⁻³⁴ J/s)

c = velocidade da luz (2.998 x 10⁸ m/s)

ln_e = logaritmo natural da emissividade da superfície.

A imagem de emissividade foi obtida a partir da metodologia desenvolvida por Van de Griend e Owe (1993), a qual relaciona a emissividade com o NDVI, conforme a tabela 3.

Tabela 3: Imagem NDVI utilizada pelo algoritmo (LST)

| NDVI | Emissividade |
|-----------------------|-------------------------|
| NDVI < -0.185 | 0.995 |
| -0.185 ≤ NDVI < 0.157 | 0.985 |
| 0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727 | 1.009 + 0.04 x ln(NDVI) |
| NDVI > 0.727 | 0.990 |

Fonte: adaptado Ndossi e Avdan (2016).

Conforme Valor e Caselles (1996) o erro cometido na estimativa da emissividade utilizando a equação apresentada na tabela 3 é inferior à 0,7 % para 0,157 < NDVI < 0,727. Diversos trabalhos com a temática de recuperação da emissividade de superfície já foram realizados, como por exemplo, de Zhang *et al.* (2006) que recomendaram a utilização do NDVI para o cálculo de emissividade.

Como produto de saída foram obtidas as imagens de temperatura de superfície em graus célsius (°C). As imagens de temperatura °C foram submetidas a uma reclassificação na ferramenta “*Raster Color Slices*” do *Envi*, sendo estabelecidas 11 classes de temperatura com intervalo de 3°C.

3.2.4 Identificação de ilhas de calor urbanas

Para a identificação de ilhas de calor urbanas, primeiramente, verificou-se as estatísticas das imagens dentro do limite da cidade. Assim, anotou-se a temperatura média das imagens (Tabela 4). No segundo passo, aplicou-se a equação 5 em cada imagem com o auxílio da ferramenta *band math* do *Envi*.

$$DifT = B1 - Tmed \quad (5)$$

onde: DifT é a diferença entre a temperatura de cada pixel e a média de temperatura de toda área dentro do limite da cidade; B1 corresponde a imagem em temperatura de superfície; Tmed é o valor de temperatura média encontrado em

cada imagem.

Para melhor visualização, todas as imagens foram submetidas a uma escala de cores divididas em 13 classes, as quais compreendem diferenças de temperatura desde -5°C negativos a mais de 6°C positivos em relação à média de temperatura da imagem.

Tabela 4: Média de temperatura para cada imagem

| Imagem | Média (°C) |
|------------|------------|
| 12/01/1994 | 28,91 |
| 26/01/2005 | 29,34 |
| 19/01/2014 | 30,99 |
| 07/04/1996 | 20,70 |
| 22/04/2007 | 24,86 |
| 22/04/2013 | 22,47 |
| 29/08/1996 | 15,02 |
| 28/08/2007 | 16,37 |
| 28/08/2013 | 15,41 |
| 23/11/1998 | 30,24 |
| 26/11/2005 | 31,34 |
| 16/11/2013 | 26,45 |

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta etapa compreende a apresentação dos principais resultados alcançados com o desenvolvimento do presente trabalho. Para tanto, os resultados estão dispostos em três seções. Primeiramente, apresentam-se os resultados relacionados a expansão urbana da cidade para o período de análise. Posteriormente as análises das imagens de temperaturas de superfície de todas as imagens divididas por estação do ano. No terceiro momento, apresentam-se os produtos e análises relacionados a identificação de ilhas de calor urbanas na área de estudo.

4.1 Expansão urbana 1994 a 2014

A classificação supervisionada aplicada em cada imagem possibilitou verificar a expansão das áreas construídas na cidade de Santa Maria. Todas as imagens classificadas apresentaram um índice de desempenho *Kappa* muito bom, de acordo com a tabela de qualidade desenvolvida por Lands e Koch. Assim, constatou-se que, para o ano 1994, a classe urbano representou 2700 hectares. Sendo que, de 1994 a 2005 ocorreu

um incremento de 800 hectares na cidade. No último ano da série estudada, a classe urbano somou aproximadamente 4600 hectares, ou seja, uma taxa de crescimento de 70% em relação a 1994 (Tabela 5).

Tabela 5: Área e taxa de crescimento para a classe urbano 1994-2014

| Ano | Área ha | Incremento ha | Taxa de crescimento % |
|-------------|---------|---------------|-----------------------|
| 1994 | 2700,00 | - | - |
| 1996 | 2800,00 | 100,00 | 3,70 |
| 1998 | 3000,00 | 200,00 | 7,14 |
| 2005 | 3500,00 | 500,00 | 16,67 |
| 2007 | 3800,00 | 300,00 | 8,57 |
| 2013 | 4400,00 | 600,00 | 15,79 |
| 2014 | 4600,00 | 200,00 | 4,55 |
| 1994 a 2005 | | 800,00 | 29,63 |
| 1994 a 2014 | | 1900,00 | 70,37 |

A partir da análise das imagens classificadas, verificou-se que as áreas de maior expansão urbana compreendem as regiões oeste, centro, e leste da cidade. A figura 5 representa as áreas da classe urbano para os anos de 1994, 2005 e 2014, sendo possível identificar as áreas de expansão. Assim, pode-se dizer que a cidade exibiu uma expansão urbana na direção leste-oeste, um dos motivos é a existência de barreiras físicas do rebordo do Planalto e os morros de sudeste.

A região oeste, é caracterizada por bairros de periferia, sendo que nela existem dois conjuntos habitacionais que contribuíram para a expansão da região. Já na região leste, por estar inserida a Universidade Federal de Santa Maria, apresenta um crescimento cada vez mais evidente, já que muitas vezes os estudantes e funcionários da instituição optam por residir em suas proximidades. Assim, o investimento em novos empreendimentos imobiliários contribui para a expansão urbana da região.

O processo de classificação também permitiu a compreensão da distribuição das temperaturas de superfície na cidade. A partir do conhecimento da distribuição dos diferentes tipos de cobertura presentes na cidade foi possível constatar quais áreas que predominavam as temperaturas mais brandas e as mais elevadas. Na maioria das imagens constatou-se que a classe

urbano apresentou temperaturas superiores que as demais classes. No entanto, nas áreas com predomínio de solo exposto também ocorreram temperaturas altas. Em contrapartida, constatou-se que nas áreas com vegetação as temperaturas permaneceram mais amenas (Tabela 6).

A menor temperatura em áreas com vegetação também foi encontrada por Kumar e Shekhar (2015) a partir da correlação entre a temperatura de superfície terrestre e índices de vegetação e área construída. Ainda, Alves *et al.* (2012) constataram que áreas mais arborizadas apresentaram temperaturas menores que as áreas menos arborizadas na cidade. Assim, confirma-se a contribuição que a implantação de áreas com cobertura vegetal proporcionaria às áreas mais quentes da cidade.

Tabela 6: Temperatura média para as classes de cobertura

| Imagem | Urbano | Veg. | Campo | Solo | Água |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Jan/94 | 31,89 | 25,86 | 27,92 | 29,83 | 26,04 |
| Jan/05 | 31,99 | 23,65 | 27,76 | 31,15 | 25,45 |
| Jan/14 | 34,01 | 27,80 | 29,58 | 31,13 | 27,97 |
| Abr/96 | 22,30 | 18,87 | 20,46 | 21,82 | 21,16 |
| Abr/07 | 26,86 | 22,83 | 24,07 | 26,48 | 24,83 |
| Abr/13 | 22,63 | 19,24 | 21,59 | 22,99 | 20,32 |
| Ago/96 | 14,95 | 12,21 | 14,66 | 15,78 | 14,18 |
| Ago/07 | 16,47 | 12,72 | 15,40 | 17,09 | 14,04 |
| Ago/13 | 14,96 | 12,46 | 14,65 | 15,45 | 12,13 |
| Nov/98 | 33,14 | 26,31 | 29,49 | 32,94 | 25,44 |
| Nov/05 | 33,47 | 26,38 | 30,11 | 33,53 | 26,47 |
| Nov/13 | 29,60 | 22,31 | 25,36 | 26,48 | 21,66 |

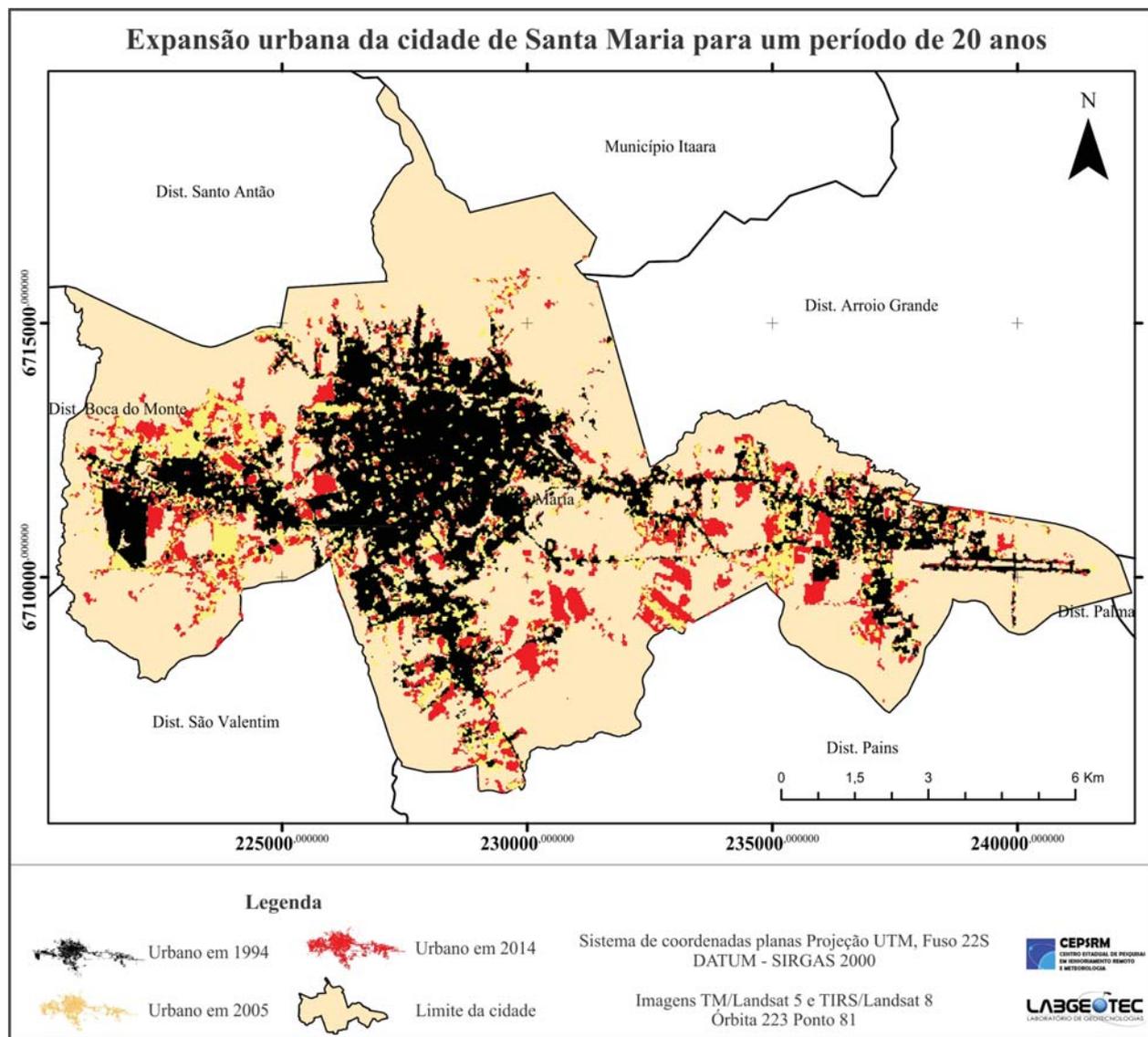


Fig. 5 – Expansão urbana da área de estudo.

4.2 Temperatura de superfície - Verão

O processamento das imagens da banda do infravermelho termal, banda 6 Landsat5 e banda 10 Landsat 8, possibilitou a caracterização da distribuição da temperatura de superfície na área de estudo para as quatro estações do ano. Neste sentido, imagens dos meses de janeiro, abril, agosto e novembro representam as estações verão, outono, inverno e primavera respectivamente. Os meses citados foram escolhidos devido a disponibilidade de imagens sem interferências de nuvens ou ruídos.

Para as imagens de janeiro observou-se temperaturas elevadas variando no intervalo de 23°C a mais de 38°C (Figura 6). Na imagem de 1994 constatou-se o predomínio de basicamente quatro classes de temperatura (23 a 26°C, 26 a 29°C, 29 a 32°C e 32 a 35°C), sendo que apenas 2% da área total da cidade verificou-se temperaturas de 35 a 38°C.

Na imagem de 2005 verificou-se o predomínio das mesmas classes de temperatura da imagem de 1994. No entanto, algumas áreas apresentaram-se com temperaturas mais amenas entre 20 e 23°C, representando 5% da área total da cidade. Em contrapartida, na classe de 35 a 38°C observou-se um aumento de 1% da área em relação a 1994. Ao analisar as imagens verificou-se que as temperaturas mais elevadas também ocorreram em regiões com cobertura de campo e solo exposto. Este fato pode ter ocorrido devido ao baixo volume de precipitação registrado 30 dias antes da imagem, segundo dados do INMET, sendo este mês caracterizado por baixo índice pluviométrico.

Ao analisar a imagem de 2014 contou-se um aumento nas temperaturas em relação aos anos anteriores. Sendo que, ocorreu o predomínio de temperaturas de 26°C a mais que 38°C. A classe de 35°C a 38°C representou 10% da área total da cidade. Nesta imagem, também ocorreram temperaturas superiores a 38°C, o que não constatou-se nas imagens de 1994 e 2005.

Ao comparar as três imagens observou-se um aumento gradativo das temperaturas. Em janeiro de 1994, 44% da cidade apresentou temperaturas entre 26°C a 29°C. Já para os anos de 2005 e 2013 as temperaturas entre 29°C a 32°C ocorreram em 34% e 40% da área da cidade respectivamente. A justificativa para este fato pode ter sido o aumento das áreas construídas na cidade, como verificado na seção anterior.

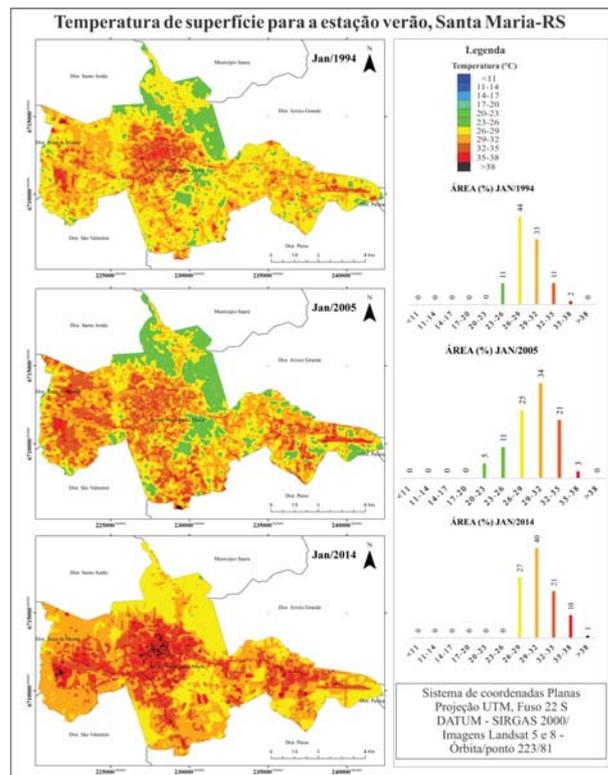


Fig. 6 - Imagens de temperatura de superfície para as imagens de janeiro de 1994, 2005 e 2014.

4.3 Temperatura de superfície – Outono

Nas imagens do mês de abril para os anos de 1996, 2007 e 2013 predominaram temperaturas mais amenas. Os valores de temperatura variaram de 14°C a 32°C (Figura 7). Para o ano de 1996 as classes representativas da estação somaram 90% da área total com temperaturas entre 17°C e 23°C. Sendo que, 7% da área da cidade exibiu valores entre 23°C a 26°C.

Para a imagem de 2007 as temperaturas de 20°C a 29°C representaram 98% da área total, sendo que, no restante da área ocorreram temperaturas mais elevadas de 29°C a 32°C. Na imagem de 2007, é visível o aumento das temperaturas, pois as cores não apresentaram-se de forma homogênea como nas demais imagens. Para a data da imagem também foram registradas maiores temperaturas do ar, com máxima de 35°C, como foi exposto na Figura 3-C. A precipitação também foi mais baixa 30 dias antes da imagem em relação as outras imagens da estação (Figura 3-A).

Na imagem de 2013 ocorreu o predomínio de temperaturas de 17°C a 29°C. Diferente de 2007 anterior, as temperaturas de 20°C a 26°C

somaram 68% da área total da cidade. Observou-se um aumento das temperaturas em relação ao ano de 1994, no entanto, comparando a 2007 as temperaturas foram menores.

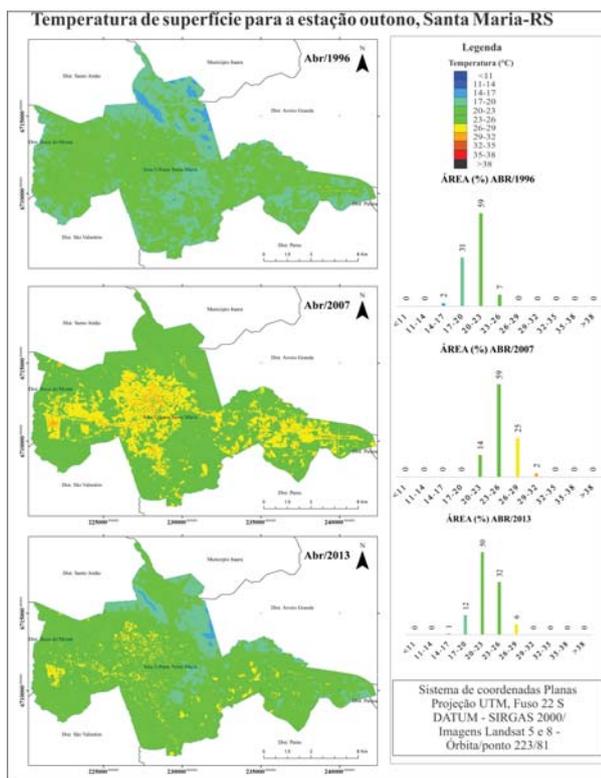


Fig. 7 - Imagens de temperatura de superfície para as imagens de abril de 1996, 2007 e 2013.

4.4 Temperatura de superfície - Inverno

A estação do inverno caracterizou-se com as menores temperaturas, sendo que observaram-se valores inferiores a 11°C e com máxima de 23°C (Figura 8).

Para a imagem de 1996 a classe de 14°C a 17°C ocorreu em 69% da área total da cidade. Já, as temperaturas de 17°C a 20°C foram registradas em 10% da área, em localizações dentro do ambiente construído.

Na imagem de 2007 verificou-se que a classe de 14°C a 17°C passou a representar uma menor área, 44%. Em contrapartida, as temperaturas entre 17°C a 20°C, que em 1996 representavam 10% da área, para 2007 foram verificadas em 40% da área da cidade. Para este ano, 3% da área da cidade (áreas construídas) apresentou temperaturas entre 20°C a 23°C.

Na imagem de 2013 verificou-se novamente o predomínio das classes de 14°C a 17°C e 17 a 20°C, com cada uma representando 58% e 21%

da área da cidade, respectivamente. Comparando as três imagens constatou-se que as temperaturas entre 17°C a 20°C apresentaram um aumento em relação ao ano de 1996. E as áreas com temperaturas de 11°C a 14°C diminuíram no decorrer da série estudada.

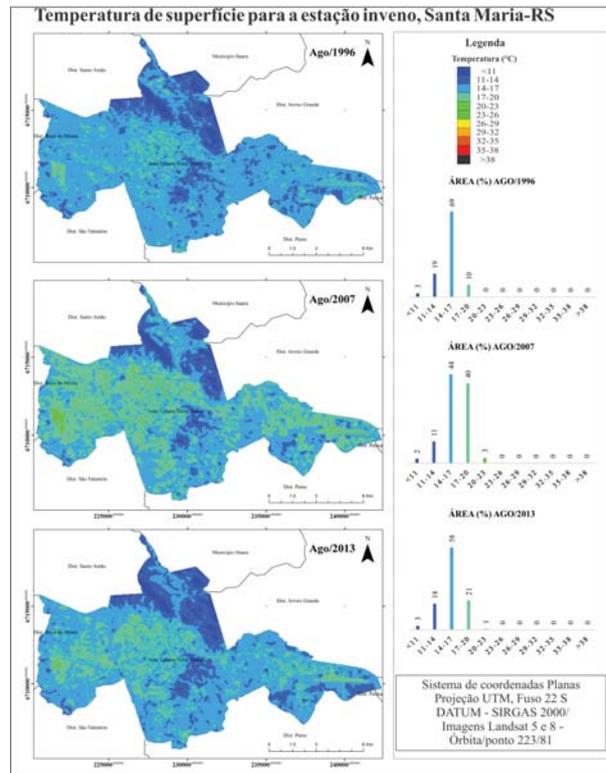


Fig. 8 - Imagens de temperatura de superfície para as imagens de agosto de 1996, 2007 e 2013.

4.5 Temperatura de superfície - Primavera

Assim como no verão, as imagens da primavera também apresentaram-se com temperaturas mais elevadas. Os valores mínimos registrados foram de 17°C e a máxima foi superior a 38°C (Figura 9). Para a imagem de 1998 as temperaturas de 26°C a 35°C representaram 89% da área da cidade. Sendo que, as temperaturas mais elevadas, 35°C a 38°C, ocorreram em áreas construídas representando 5% do total.

A imagem de 2005 apresentou os valores mais elevados de temperatura de todas as imagens analisadas. Desta forma, as temperaturas de 35°C a 38°C que foram registradas em apenas 5% da área em 1998, em 2005 passou a 14%. As temperaturas superiores a 38°C somaram 4% da área da cidade. Vale destacar, que as temperaturas mais elevadas foram todas registradas em áreas com predomínio de construções. O baixo

volume de precipitação (aproximadamente 50 mm) registrado 30 dias antes da imagem, assim como baixa umidade relativa do ar e velocidade do vento de aproximadamente 1 m/s registrados na estação do INMET podem ter contribuído para o aumento da temperatura de superfície em novembro/2005. Sendo que, 2005 foi considerado um ano de estiagem no Estado do Rio Grande do Sul.

Na imagem de novembro/2013, em 46% da área da cidade identificou-se temperaturas de 20°C a 26°C, caracterizando um aumento de áreas com temperaturas mais amenas em relação as imagens de 1998 e 2005. A diminuição das temperaturas pode ter ocorrido porque 30 dias antes da imagem foram registrados valores elevados de chuva, chegando a 300 mm. No entanto, cabe destacar que mesmo assim, as áreas urbanizadas exibiram os valores mais elevados de temperaturas.

apenas 2% da área total da cidade e passou a assumir um total de 10% em 2014. No o outono, o aumento foi verificado para temperaturas de 23°C a 26°C. Em abril/1996 a referida classe representou 7% da área, para os anos de 2007 e 2013 foi superior a 30 % da área da cidade. No inverno, as temperaturas de 17°C a 20°C apresentaram um aumento, de 10 % em 1996 para 40% em 2007. Já para o ano de 2013, a referida classe apresentou um aumento para 21% em relação a 1996. Em relação a estação da primavera, constatou-se que o aumento das temperaturas ocorreu somente da imagem de 1998 para a de 2005, pois a de 2013 apresentou temperaturas mais amenas.

Neste trabalho verificou-se que dois fatores justificaram as situações citadas no parágrafo anterior. A primeira é a questão do aumento das áreas construídas na cidade, como foi possível constatar a partir das classificações das imagens. Diversos trabalhos científicos concluem que em áreas que predominam materiais de construção como, concreto, asfalto, telhados de diversos materiais tendem a apresentar temperaturas superiores do que áreas com predomínio de cobertura natural. Assim, com o aumento das áreas construídas, consequentemente, as imagens de temperatura de superfície mostraram um aumento das áreas com temperaturas mais elevadas ao longo da série estudada. O segundo fator é a condição meteorológica da área de estudo, como por exemplo, a distribuição das chuvas em alguns dias antes das imagens. Um exemplo é a imagem de novembro de 2013, a estação meteorológica do INMET registou valores elevados de precipitação trinta dias antes da passagem do satélite, o que contribuiu para que as temperaturas se apresentassem mais amenas.

A partir das imagens do infravermelho termal foi possível realizar uma caracterização da distribuição das temperaturas na cidade de Santa Maria. Assim, duas questões puderam ser expostas. A primeira, diz respeito caracterização de cada estação do ano quanto as temperaturas de superfície na cidade. A segunda deixa claro que a partir das imagens foi possível identificar um aumento de áreas com temperaturas mais elevadas ao longo da série estudada, e assim, reafirmar que a ampliação de áreas urbanizadas contribui para a ocorrência de temperaturas elevadas.

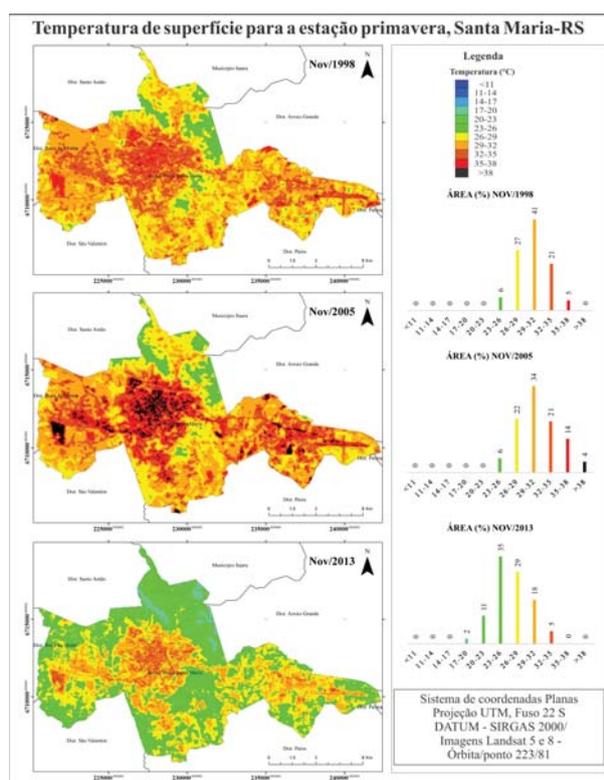


Fig. 9 - Imagens de temperatura de superfície para as imagens de novembro de 1998, 2005 e 2013.

4.6 Ilhas de calor urbanas

Ao analisar as imagens anteriormente apresentadas identificou-se um aumento das temperaturas de superfície para as todas as estações do ano. Na estação do verão, verificou-se um incremento para temperaturas de 35°C a 38°C, sendo que em 1994 esta classe somava

Neste sentido, a partir da metodologia citada foi possível identificar a distribuição das ilhas de calor urbanas (Figura 10). Assim, verificou-se que as diferenças de temperatura em relação à média de cada imagem variaram de -5°C negativos a valores superiores a 6°C positivos. Cabe destacar, que as diferenças negativas ocorreram em áreas com predomínio de cobertura vegetal. Já as diferenças positivas identificaram áreas com construções ou solo exposto.

Neste trabalho, as diferenças positivas superiores a 3°C foram denominadas de ilhas de calor urbanas para a cidade de Santa Maria. Conforme pode ser constatado na figura 10, foi possível identificar as áreas que mais ocorrem ilhas de calor, sendo algumas áreas nas regiões leste, centro e oeste da cidade. Com uma breve análise visual das imagens de ilhas de calor urbanas foi possível constatar que nas

estações de primavera e verão o fenômeno é mais proeminente, registrando diferenças de temperaturas superiores a 6°C . Sendo que, nas regiões mais centrais ocorreu a concentração de temperaturas mais elevadas. Já para as estações de outono e inverno, mesmo que as ilhas de calor tenham se apresentado bem definidas, verificou-se que nestas áreas as diferenças de temperatura foram menores em relação à média do que nas outras estações.

A partir do fatiamento das imagens em classes de diferenças de temperaturas também foi possível extrair informações a respeito da soma das áreas de cada classe. O que permitiu verificar que as áreas com temperaturas superiores a 3°C de diferença em relação à média apresentaram uma tendência de aumento ao longo da série estudada. Este fato ocorreu para todas as estações do ano (Figura 11).

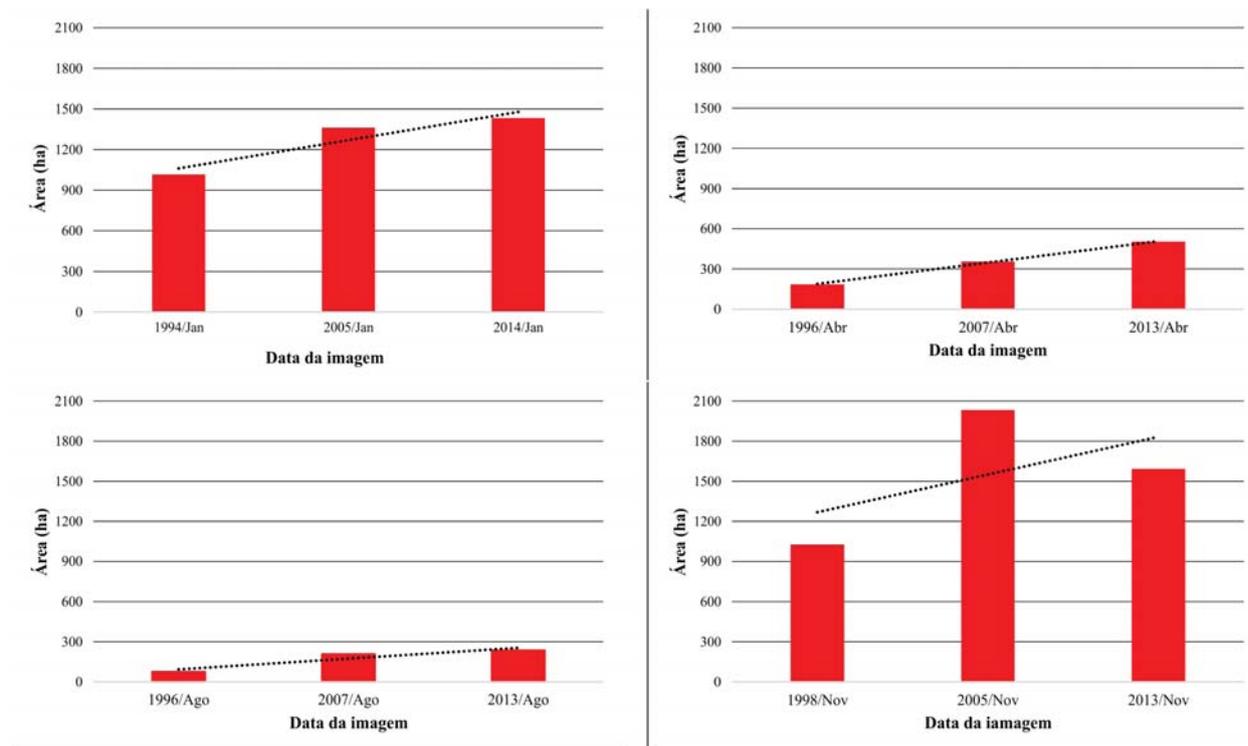


Fig. 11 – Área que as ilhas de calor urbanas representaram na série temporal de imagens estudadas.

Nas imagens do verão, as ilhas de calor que em 1994 ocupavam uma área de aproximadamente 900 hectares, em 2014 passaram para quase 1400 hectares. Nas imagens do outono aproximadamente 185 hectares apresentavam temperaturas com diferenças superiores a 3°C , para abril de 2013 subiu para 350 hectares. Para o inverno, mesmo apresentando menor ocorrência de ilhas de calor, estas de 76 hectares em 1996 passaram a ocupar

230 hectares em 2013. Assim como no verão, nas imagens da primavera o aumento das áreas com ilhas de calor urbanas foi bem representativo, passou de 900 hectares em 1998 para a 1500 em 2013.

Como em diversos trabalhos, neste também verificou-se que as áreas com cobertura vegetal tendem a apresentar temperaturas mais amenas. Conforme Gartland (2010), a

presença de vegetação pode reduzir as ilhas de calor de duas formas. A primeira diz respeito as sombras produzidas pelas árvores para as pessoas, pavimentos e edifícios o que mantém as superfícies mais frescas. A segunda fala que, no processo de evapotranspiração, as plantas utilizam a energia solar para evaporar água, assim esta energia não seria utilizada para aquecer a cidade.

Ao substituir as superfícies naturais, como vegetação, por materiais urbanos os quais são impermeáveis e não evaporativos, ocorre um escoamento acelerado das águas das chuvas, sendo que parte é coletada pelos sistemas urbanos de saneamento, ocasionando a diminuição de água disponível e o tempo de evaporação. Desta forma, nas áreas urbanas, toda a radiação líquida à superfície é convertida em fluxo de calor sensível e assim ocorre um aumento de temperatura. Já as áreas com vegetação, as temperaturas tendem ser menores devido ao efeito de sombreamento das superfícies e os altos níveis de calor latente devido a maior disponibilidade de água disponível para a evaporação e evapotranspiração (OKE, 1982).

Conforme Christen e Vogt (2004), as áreas urbanas por apresentarem materiais, como asfalto, concreto e telhados, apresentam baixo albedo. Assim, geralmente as áreas urbanizadas refletem menos e absorvem mais radiação solar o que ocasiona um aumento na temperatura de superfície. Sendo que, as áreas urbanizadas são mais eficientes em armazenar energia solar, podendo absorver e armazenar duas vezes mais calor do que as áreas rurais.

Pode-se dizer que os resultados obtidos com o presente trabalho estão de acordo com estudos como Streutker (2003), Weng *et al.* (2003), Kumar e Shekhar (2015) os quais mostram que a ilha de calor urbana é consequência do processo de urbanização. Sendo destacado o papel da vegetação como importante aliado para a amenização das temperaturas na cidade.

5. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas nesta pesquisa foi possível estabelecer algumas conclusões acerca das temperaturas de superfície para todo o perímetro urbano de Santa Maria. Com a avaliação temporal das informações foi possível assinalar o aumento de temperatura para o período estudado. O que contribuiu para este fato

pode ter sido o incremento das áreas construídas na cidade, sendo que as temperaturas em áreas com cobertura construída apresentaram-se mais elevadas. Em contrapartida, as áreas com cobertura vegetal apresentam temperaturas mais brandas.

A partir da análise espacial da temperatura de superfície foi possível identificar áreas que apresentaram temperaturas mais elevadas para toda a série estudada, configurando ilhas de calor urbanas. Destacam-se, as regiões: oeste (proximidades dos bairros Tancredo Neves e Juscelino Kubistchek), região central (bairro Centro), e região leste (aeroporto localizado no bairro Camobi). Pode-se dizer que o fenômeno de ilhas de calor urbanas ocorreu para todas as estações da série estudada. No entanto nos meses de novembro e janeiro, a intensidade das ilhas de calor foi maior, registrando temperaturas com 6°C superiores à média.

Todas as constatações verificadas com o desenvolvimento do presente trabalho permitem afirmar o quanto é importante o estudo da distribuição da temperatura na cidade, pois a partir disto foi possível identificar áreas com temperatura mais elevadas, bem como o possível aumento destas áreas com o passar dos anos. Sabe-se que as condições térmicas do ambiente influenciam muito no cotidiano das pessoas, seja em questões de saúde, seja para a realização das mais variadas atividades. Assim, questões relacionadas ao conforto térmico das cidades também devem ser levadas em consideração nos planos diretores das cidades, já que a urbanização é cada vez mais crescente.

Desta forma, pode-se dizer que os resultados obtidos demonstraram a eficiência do sensoriamento remoto como aliado na análise e identificação de ilhas de calor urbanas, pois mesmo com a utilização de imagens de média resolução espacial, foi possível apontar as regiões que necessitam mais atenção dos gestores públicos. Como explanado anteriormente, as áreas vegetadas apresentaram as temperaturas mais brandas. Desta forma, uma alternativa para o melhor conforto térmico em áreas residenciais seria a implantação de espaços com cobertura vegetal. Então, um plano de paisagismo ajudaria a minimizar os efeitos das altas temperaturas nas regiões mais quentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE SANTA MARIA. (ADESM). **Aspectos gerais de Santa Maria**. Disponível em: <<http://santamariaemdados.com.br/1-aspectos-gerais/>> Acesso: 18 janeiro 2017.

ALBERT, M. WEEKS, R. COE, S. Urban land-cover change analysis in Central Puget Sound. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, v. 70, n. 9, p. 1043-1052, 2004.

ALVES, D. B. FIGUEIRÓ, A. S. Vegetação urbana e variabilidade do campo térmico em áreas selecionadas da cidade de Santa Maria (RS). **Revista GEONORTE**, Edição especial, v. 2, n.4, p.1111-1125, 2012.

BARROS, H. R. de; LOMBARDO, M. A. Zoneamento climático e urbano da cidade do Recife: uma contribuição ao planejamento urbano. **GEOUSP**, São Paulo, n. 33, p. 187 – 197, 2013.

CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P. X.; YIN, Z.Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing Environment**, v.104, p. 133-146, 2006.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a Central European city. **International Journal of Climatology**, Chichester, v.24, p.1.395-1.421, 2004.

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data**. Principles and practices. 2 ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 210 p.

COSTA, D. F. da.; SILVA, H. R.; PERES, L. de F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira – SP através da utilização de geotecnologias. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.5, p. 974-985, 2010.

DENG, C.; WU, C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: a spectral unmixing and thermal mixing approach. **Remote Sensing**

Environment, v.131, p. 262-274, 2013.

FRANÇA, A. F. de; TAVARES JUNIOR, A. R.; MOREIRA FILHO, J.C.C. Índices, NDVI, NDWI, NDBI como ferramentas ao mapeamento temático do entorno da lagoa olho D'Água, em Jabotão dos Gauraroes-PE. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2012. **Anais**. p.001-009, 2012.

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 148p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm> Acesso: 20 janeiro 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso: 01 janeiro 2017.

KÍNOVÁ, A.; DOBROVOLNY, P. A neural nets urban land cover classification: a case study of Brno (Czechia). **AUC Geographica**, v.50, n.2, p. 153-163, 2015.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259 – 263, 2006.

KUMAR, D.; SHEKHAR, S. Statistical analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship through thermal remote sensing. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.121, p. 39-44, 2015.

LANDIS, J.; KOCH, G. G. The measurements of agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 3, p. 159 – 179, 1977.

LIMA, V.; AMORIM, M. C. C. T. A utilização de informações de temperatura da superfície, do NDVI e de temperatura do ar na análise de

- qualidade ambiental urbana. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais**. p. 128-135, 2011.
- LIU, L.; ZHANG, Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. **Remote Sensing**, v.3, p. 1535-1552, 2011.
- LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.
- MICHISHITA, R.; JIANG, Z.; XU, BING. Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p.3-18, 2012.
- NDOSI, M. I.; AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.
- NUCCI, J. C. Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília. 2ª ed. Curitiba: O Autor, 2008.
- OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environments**, v. 7, n. 8, 769-779, 1973.
- OKE, T.R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v.108, p.1-4, 1982.
- ORTIZ, G. F.; AMORIM, M.C.C.T. Temperatura da superfície da cidade de Cândido Mota-SP a partir da imagem de satélite Landsat 7. **Revista Geográfica da América Central**, v.1, p. 1-16, 2011.
- QUATTROCHI, D. A.; RIDD, M. K. Measurement and analysis of thermal energy from discrete urban surfaces using remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 10, p. 1991-2022, 1994.
- RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2ed. New York: Springer-Verlag, 1993.340p.
- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul**: variabilidades, tendências e tipologia. 2011. 253f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- SARTORI, M. G. B. **Clima e Percepção**. 2000. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- SARTORI, P. L. P. Geologia e Geomorfologia de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**. Santa Maria, n. 38, p.19-43, jan./jun. 2009.
- SCHOTT, J. R. **Remote Sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University, 1997.394p.
- SILVA, E. N.; RIBEIRO, H.; SANTANA, P. Clima e Saúde em Contextos Urbanos: Uma Revisão da Literatura. **Biblio 3W**, Barcelona, v. 19, n.1092 p.1-27. 2014.
- SMALL, C. Multitemporal analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n.3, p. 427-442, 2002.
- STREUTKER, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v.85, p.282 – 289, 2003.
- VALOR, E.; CASELES, V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South Americas áreas. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 167 – 184, 1996.
- VAN de GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119 – 1131, 1993.
- WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v.89, p.467-483, 2003.
- XU, H. Extraction of urban built-up Land features from Landsat imagery a thematic-oriented index combination technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 73, n. 12, p. 1381- 1391, 2007.
- ZHA, Y. J. GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery.

International Journal of Remote Sensing. v. 24, n.3, p.583-594, 2003.
ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C++ program

for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1796 – 1805, 2006.