

Análise da influência das correções atmosférica e pela emissividade nos dados estimados de temperatura da superfície

Luana Thayza de Oliveira¹
Jefferson Fernandes Teixeira Júnior^{1,2}

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{luana.oliveira; jefferson.teixeira}@inpe.br

² Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
Caixa Postal 6044 - 12.231-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

Abstract. The increasing availability of thermal sensing data has enabled studies aimed at the understanding of relationships between thermal processes and land surface temperature (LST). In this study, it was evaluated an atmospheric correction model proposed by Barsi (2003), which also includes the correction for the emissivity of the objects in scene, in an area of São José dos Campos, SP. Results from processing TIRS / Landsat 8 data showed differences of up to 10 °C between the surface temperature and estimated apparent temperatures. It was also noted that in different land use and land cover classes the effect of these corrections happen unevenly. Correcting only surface emissivity showed less influences over the entire area, despite higher differences was observed on bare soil areas, since its emissivity value is the fewer compared to other classes. Otherwise, correcting only the atmospheric effects resulted in higher influences in LST values for all classes, mainly for urban and bare soil. Finally, the complete correction, which considers both atmospheric and emissivity effects, impacts significantly the temperature values, producing higher values compared to the other corrections. These results highlight the importance of these corrections in studies focused on temperature dynamics generated by changes in land use.

Palavras-chave: clima urbano, infravermelho termal, emissividade, correção atmosférica, urban climate, thermal infrared, emissivity, atmospheric correction.

1. Introdução

A intensidade de urbanização, expressa em termos de espaço construído, altera significativamente o clima das cidades de forma dependente da localidade, de acordo com a intensidade de uso do solo, o processo de crescimento urbano e as características geoecológicas do lugar (DIAS, 2014). Os efeitos mais diretos dessas alterações são percebidos pela população através de manifestações relacionadas ao conforto térmico, à qualidade do ar e aos impactos pluviiais, capazes de afetar negativamente a vida social e comprometer a qualidade de vida dos habitantes (MONTEIRO, 1976).

Parte considerável do processo de urbanização ocorre com supressão das áreas verdes e substituição da superfície do solo por materiais não-evaporativos e não porosos, como asfalto, concreto, entre outros, resultando em um aumento geral da temperatura da paisagem, resultando em um clima próprio ou clima urbano (MONTEIRO e MENDONÇA, 2011; MONTEIRO, 1976).

O estudo de climas urbanos tem sido favorecido pela crescente disponibilidade de dados de sensores termais aeroembarcados e orbitais. A correta interpretação dos dados obtidos pelos sensores e de como estes dados se relacionam com as atuais propriedades da superfície terrestre exige a definição adequada das variáveis envolvidas nos processos de sensoriamento remoto. Segundo Voogt e Oke (2003), a temperatura da superfície, importante variável para o estudo de climas urbanos, resulta de processos de balanço de energia que incorporam os efeitos das propriedades radiativas e termodinâmicas da superfície, emissividade, contribuições da radiação solar e atmosférica incidentes, etc.

O termo temperatura de brilho é designado para descrever a temperatura resultante da inversão da lei de Planck de um dado de radiação obtido por um sensor termal operando em

determinado comprimento de onda. A temperatura de brilho está relacionada à radiância registrada pelo sensor sem qualquer correção de influências sobre a radiação desde sua emissão pela superfície até atingir o sistema sensor (VOOGT e OKE, 2003).

A correção dos efeitos da atmosfera e da emissividade da superfície sobre a temperatura de brilho resulta na temperatura de superfície terrestre (TST), através da qual é possível inferir sobre os processos térmicos que ocorrem na superfície terrestre. Assim, ao corrigir tais efeitos, espera-se que os resultados de TST sejam mais próximos da temperatura real dos objetos.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo investigar o impacto desses tipos de correção sobre a estimativa da TST, considerada de fundamental importância para o estudo de clima urbano, uma vez que esta é um dos parâmetros responsáveis por modular a temperatura do ar nas camadas atmosféricas próximas à superfície.

Assim, como forma de analisar a influência que os processos de correção atmosférica e pela emissividade geram nos dados estimados de TST, foi utilizado o modelo de correção atmosférica da radiância termal apresentado por Barsi (2003), que também inclui a correção pela emissividade dos materiais da superfície analisada. Também se investigou a relação entre as classes de uso e cobertura do solo e as temperaturas estimadas com e sem tais correções.

2. Materiais e métodos

2.1. Descrição da área de estudo

A área selecionada para análise compreende parte da área urbana do município de São José dos Campos, São Paulo, Brasil, onde foram identificadas classes de uso e cobertura do solo de interesse para o objetivo deste estudo. Além disso, a escolha desta área se deu por nesta estarem situadas três estações meteorológicas, sendo que os dados da estação localizada próxima ao centro da cidade puderam ser utilizados como parâmetros de entrada para o modelo de correção atmosférica e de emissividade.

2.2. Metodologia

Para realização das análises interpretativas foram gerados dois produtos temáticos: uso e cobertura do solo e temperatura da superfície. Para isso foram utilizados dados de uma cena (órbita/ponto: 218/076) adquirida no dia 16 de setembro de 2015 pelos sensores OLI (bandas VIR, NIR, SWIR) e TIRS (banda infravermelho termal) a bordo do satélite Landsat 8, disponibilizada na plataforma Earth Explorer junto ao site da *United States Geological Survey* (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

A carta de uso e cobertura do solo foi gerada a partir de uma classificação supervisionada orientada a objeto híbrida, cujos procedimentos de segmentação e extração de atributos foram realizados no software *eCognition Developer 64* e a mineração de dados e classificação no software *Weka 3.6*. Foram utilizadas as bandas referentes ao vermelho, NIR e SWIR (resolução espacial de 30 m) organizadas em uma composição falsa-cor (654 - RGB).

As classes atribuídas foram: água, urbano, vegetação rasteira, vegetação densa e solo exposto. A validação da classificação foi realizada no próprio software *Weka 3.6* através de um conjunto de amostras. O resultado da validação indicou que 94,26 % das amostras foram corretamente classificadas pelo modelo. Posteriormente, a classificação foi corrigida visualmente no software *QGIS 2.1.10*.

Para a estimativa de temperatura da superfície foi utilizada a imagem da banda termal do sensor TIRS, que opera no intervalo espectral de 10,6 a 11,19 μm (banda 10), adquirida com resolução espacial de 100 metros e posteriormente corrigida, reamostrada e disponibilizada em 30 metros na plataforma da USGS. Os dados da imagem disponibilizados em níveis de cinza (DN) foram transformados para radiância espectral a partir da equação 1:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

onde: L_{λ} é Radiância espectral ($W/m^2 \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); M_L é um Fator multiplicativo de redimensionamento da banda ($3,34 \cdot 10^{-4}$); Q_{cal} é um valor quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (equivalente ao DN); e A_L é um fator aditivo de redimensionamento da banda (0,10).

A partir do método proposto por Barsi (2003), os dados de radiância no topo da atmosfera puderam ser convertidos para radiância de um corpo negro de temperatura cinética, em que a atmosfera é corrigida e a emissividade dos alvos é inserida no cálculo, conforme a equação:

$$L_T = \frac{L_{TOA} - L_u - (1 - \varepsilon) \cdot L_d}{\varepsilon \cdot \tau} \quad (2)$$

onde: L_T é a Radiância de um alvo negro de temperatura termodinâmica T ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); L_{TOA} Radiância espectral no topo da atmosfera ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) que equivale a L_{λ} ; τ é transmitância da atmosfera; ε é a Emissividade da superfície; L_u é a Radiância emitida pela atmosfera ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); e L_d é a Radiância incidente na superfície ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).

Os valores de transmitância atmosférica, radiância emitida pela atmosfera e radiância incidente na superfície foram calculados através da Calculadora de Correção Atmosférica (WEBCALC) disponibilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) no endereço eletrônico <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. Os dados de entrada (pressão, temperatura e umidade relativa do ar) foram obtidos junto ao banco de dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Os dados de entrada e saída deste procedimento estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados para correção atmosférica.

Dados de entrada	
Data da passagem	16/09/2015
Latitude/ Longitude	-23,1878 / -45,870
Altitude	0,604 km
Pressão	945,000 mb
Temperatura	28,1 °C
Umidade Relativa	57 %
Dados de Saída	
Transmissividade atmosférica	0.70
Radiância emitida pela superfície	2,57 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
Radiância recebida pela superfície	4,08 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

A emissividade dos alvos utilizada na equação 2 foi atribuída com base na literatura de acordo com as classes de uso e cobertura do solo obtidas a partir da classificação orientada a objeto (REES, 2001; JENSEN, 2006; NOVO, 2010). Dada a complexidade dos materiais de cobertura do solo urbano, neste trabalho adotou-se a classe de uso urbano e atribui-se a ela um valor médio obtido a partir de valores de emissividade de alvos urbanos na faixa espectral de operação do sensor TIRS/Landsat 8 (ANDRADE, 2011). Os valores de emissividade adotados por classe foram: água (0,92), uso urbano (0,95), vegetação rasteira (0,97), vegetação densa (0,98) e solo exposto (0,90).

Uma vez que a influência da atmosfera na radiância foi corrigida e esta ponderada pela emissividade média dos alvos, foi realizada a conversão para temperatura da superfície a partir da equação 3.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_T} + 1\right)} - 273,15 \quad (3)$$

onde: T_s é a estimativa da temperatura termodinâmica da superfície (em graus celsius); K_1 é a Constante de calibração 1 ($774,89 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$); K_2 é a Constante de calibração 2 ($1321,08 \text{ K}$); e L_T é a Radiância de um alvo negro de temperatura termodinâmica T ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$).

Importa destacar que a partir das diferentes formas de aplicação da equação 2 os diferentes produtos de temperatura foram obtidos. O primeiro produto, corrigido pela atmosfera e emissividade, foi obtido utilizando a equação 2 e inserindo dados de emissividade obtidos a partir da classificação por uso e cobertura do solo da área analisada. O segundo produtos, corrigido apenas pela atmosfera, foi gerado adotando a emissividade de valor unitário na equação 2 para toda a imagem, não gerando correção em relação a emissividade dos alvos. O terceiro produto, sem correção foi nenhum dos métodos, foi gerado sem o uso da equação 2, inserindo a radiância do topo da atmosfera (obtida por meio da equação 1) na equação 3, e portanto se obteve apenas a temperatura de brilho, sem qualquer correção. Por último, o quarta produto, foi realizada a correção apenas pela emissividade sobre o produto anterior, dividindo a temperatura de brilho pela raiz quarta da emissividade, gerada a partir da carta de uso e cobertura do solo, conforme equação 4, derivada da lei de Stefan-Boltzmann:

$$T = \frac{T_b}{\sqrt[4]{\varepsilon}} - 273,15 \quad (4)$$

onde: T é Temperatura obtida a partir da temperatura de brilho (T_b) de corrigida apenas pela emissividade.

Após a obtenção dos produtos de temperatura foi utilizada uma máscara temática de uso e cobertura do solo para analisar os dados de temperatura inseridos em cada uma das classes.

3. Resultados e Discussão

3.1. Correções pelo modelo de Barsi (2003)

Os mapas de uso e cobertura do solo e de temperatura de superfície, este resultante da aplicação do modelo de Barsi (2003), são apresentados na Figura 2.

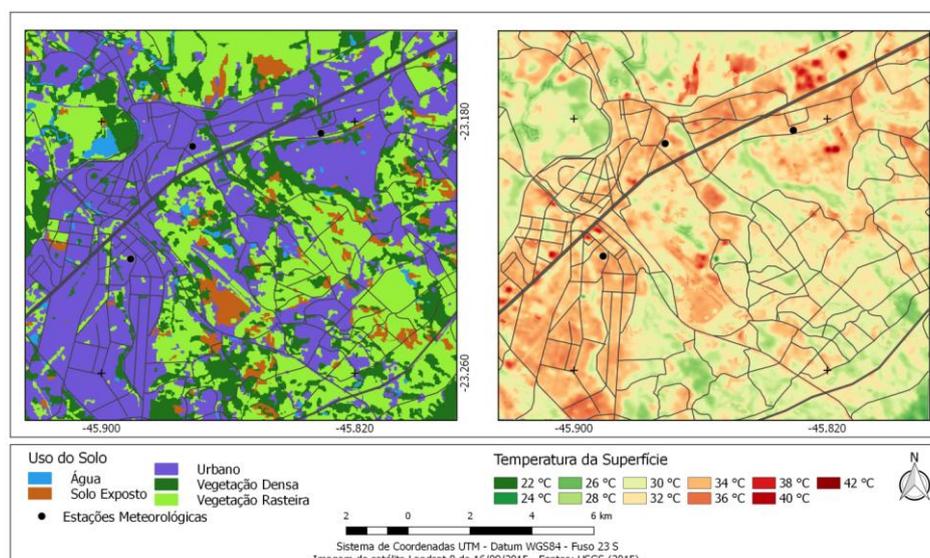


Figura 2. Mapas de uso do solo e temperatura de superfície.

É possível identificar, por meio da comparação visual entre os mapas, que as regiões onde são encontrados os maiores valores de temperatura estão inseridas nas classes urbana e solo exposto, enquanto os menores valores são observados em áreas de vegetação densa. A amplitude das temperaturas de superfície observadas na imagem foi de 20 °C.

Os pontos nos mapas identificam as localidades de estações meteorológicas cujos dados de temperatura do ar foram utilizados a título de comparação com a temperatura de superfície na análise que será apresentada no item 3.2. Destaca-se também a formação de áreas de intenso aquecimento, com temperaturas de superfície de até 42 °C, em localidades de uso urbano.

A influência da correção dos efeitos atmosféricos e da emissividade na determinação da temperatura termodinâmica da superfície pode ser analisada por meio do mapa de diferença de temperaturas apresentado na Figura 3. Nela são apresentadas as diferenças (mapa 1) entre os valores de temperatura de superfície (mapa 2) e aparente (mapa 3) distribuídas espacialmente. Os pontos coloridos têm suas cores associadas a cada tipo de uso e cobertura do solo e foram inseridos nos mapas com o intuito de melhorar a comparação visual entre as temperaturas de superfície e classes de uso do solo.

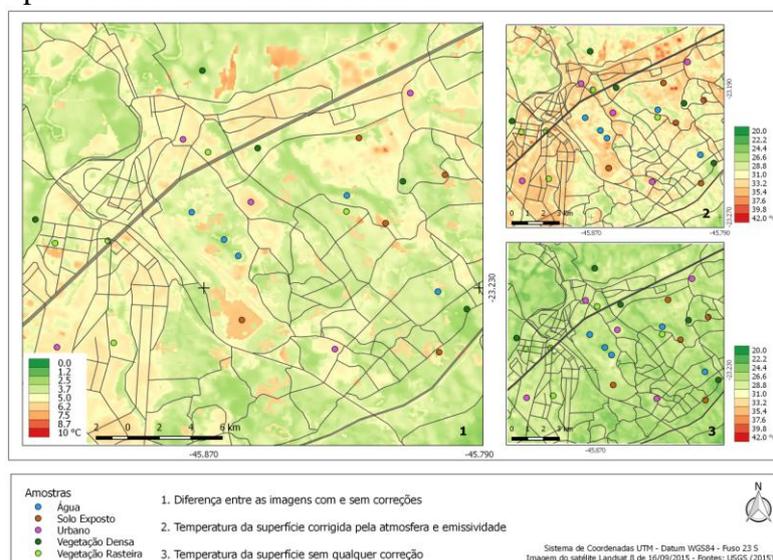


Figura 3. Diferença entre as temperaturas de superfície e temperaturas aparente.

Nota-se que as maiores diferenças de temperatura de superfície, que podem atingir a magnitude de até 10 °C, são encontradas nas áreas urbanas e de solo exposto. A fim de se avaliar qual o principal fator que contribuiu para este resultado, foram aplicadas, separadamente, a correção dos efeitos atmosféricos e a correção pela emissividade dos objetos, ambos sobre os dados de radiância aparente. Em seguida, foram calculadas as diferenças entre a temperatura de superfície obtida através da aplicação integral do método de Barsi (2003) e as temperaturas resultantes do procedimento em que, de modo isolado, pelo menos uma das correções não foi realizada. O mapeamento dessas diferenças é apresentado na Figura 4.

A partir da Figura 4 é possível observar que o efeito da ausência de correção atmosférica (mapa 1) exerce maior influência sobre os valores de temperatura da superfície em relação a correção da emissividade (mapa 2). Nas áreas urbanas e de solo exposto essa influência é ainda mais expressiva, aumentando de 3,0 °C a 6,0 °C os valores de temperatura de superfície.

O efeito da correção pela emissividade tem menor intensidade sobre os valores de temperatura de superfície, variando de 0,1 °C a 3,6 °C, sendo nas áreas de solo exposto onde essa maior diferença é percebida. De modo geral, quanto menor a emissividade, maior o valor

de temperatura estimado. Desta forma, solo exposto e área urbana, que apresentam os menores valores de emissividade, 0,90 e 0,95 respectivamente, apresentaram maior diferença entre as imagens com e sem essa correção.

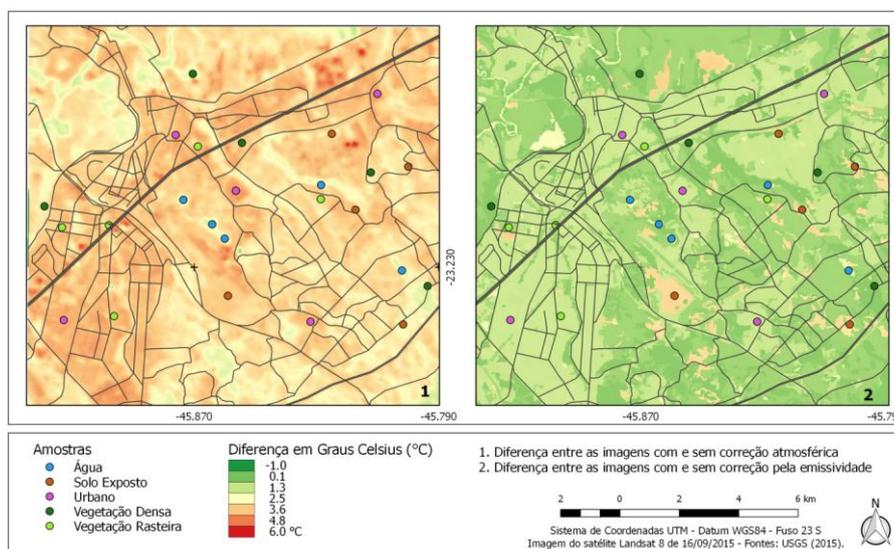


Figura 4. Mapas de diferença de temperaturas obtidas com e sem correções.

O gráfico da Figura 5 permite analisar o efeito das correções nas temperaturas da superfície por classes de uso solo. Este foi gerado a partir do cálculo de temperatura média das imagens de temperatura: aparente (sem qualquer correção), apenas com correção atmosférica, apenas com correção pela emissividade e temperatura de superfície (com ambas as correções).

Em concordância com a análise dos mapas das Figuras 2 e 3, verifica-se que as áreas de uso urbano e solo exposto apresentam as maiores diferenças entre a temperatura aparente e de superfície (resultante das correções), sendo em média 5,0 °C e 5,8 °C, respectivamente. A menor diferença média entre a temperatura da superfície e a aparente é de 3,5 °C na classe vegetação densa. Nessa perspectiva, vale ressaltar a importância de se considerar as correções na estimativa da TST, sobretudo para estudos que visam observar a dinâmica climática de áreas urbanas já que, como observado, a adoção da temperatura aparente pode subestimar a temperatura real das superfícies.

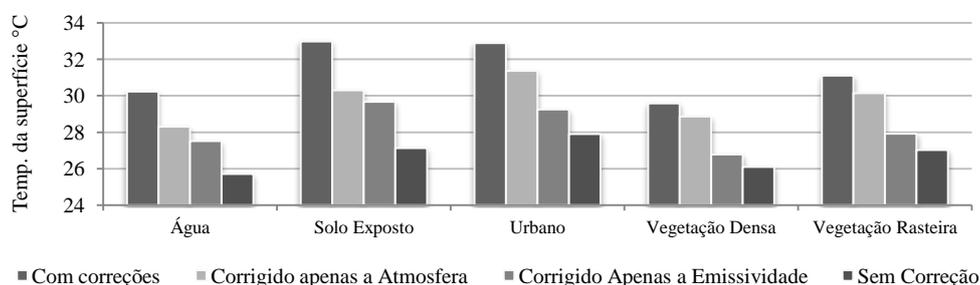


Figura 5. Gráfico de temperaturas médias por classe obtidas por diferentes graus de correção.

Como já pôde ser observada na Figura 4, a influência da correção pela emissividade dos alvos é menos expressiva que a correção atmosférica, sobretudo nas classes de vegetação. No entanto, nas classes onde a capacidade de emissão dos objetos é menor (solo exposto e urbano), essa correção resulta em temperaturas mais coerentes com a provável temperatura real da superfície.

Sobre o efeito apenas da correção atmosférica nos dados, verificou-se ser essa a correção que mais se aproxima dos valores de TST obtidos pela aplicação integral do modelo de Barsi (2003), tido aqui como uma correção adequada. Também se observou que a maior atuação desta correção se deu sobre as classes ‘urbano’ e ‘solo exposto’, onde gerou um aumento médio de 3°C na temperatura de superfície da área.

De modo geral se observou que a aplicação do modelo de Barsi (2003), ao realizar conjuntamente a correção da atmosfera e pela emissividade, resulta em valores de temperatura mais elevados em relação àqueles obtidos através das correções de um ou outro efeito separadamente.

A fim de avaliar se a diferença de temperatura observada entre as imagens que receberam diferentes níveis de correção é significativa, foi realizada a análise de variância não-paramétrica de Kruskal-Wallis (KW). Este teste é utilizado para comparar três ou mais grupos de dados independentes. Na análise realizada adotou-se nível de significância (α) de 5%, assim, quando encontrada diferença significativa, procedeu-se com testes de comparações múltiplas.

Foram gerados 90 pontos aleatórios nas quatro imagens. O teste de Kruskal-Wallis apresentou p-valor inferior ao valor crítico adotado de 0,05, assim foi possível identificar que pelo menos um dos grupos era significativamente diferente dos demais. Dessa forma adotou-se o teste comparação múltipla. Através deste, foi possível verificar que o grupo de dados referente à imagem que recebeu tanto a correção atmosférica quanto pela emissividade (Temp. sup.) teve uma diferença significativa dos demais ao nível de 95% (Figura 6-a).

Na comparação por pares observou-se que a imagem que não recebeu qualquer correção (Temp. aparente) não se distingue estatisticamente da imagem que recebeu apenas a correção pela emissividade (Temp. aparente emiss.) (Figura 6-b). O p-valor observado nesta análise foi de 0,56. Nos gráficos da figura 6, a cor azul representa o grupo sobre o qual é feita a análise, a cor vermelha os grupos significativamente diferentes e em cinza o que não apresentou diferença estatística ($p > 0,05$).

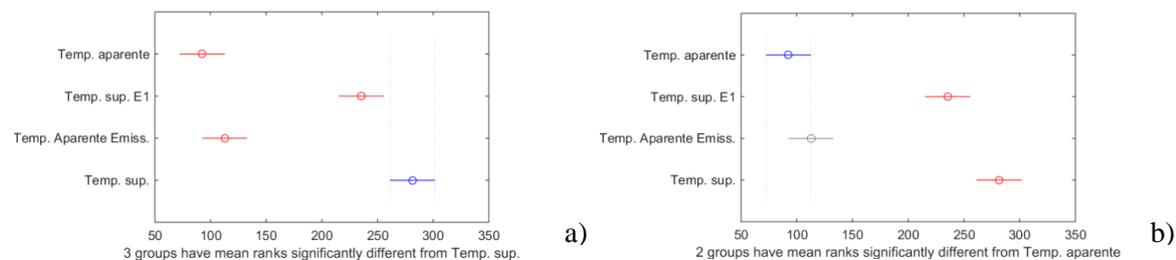


Figura 6. a) Grupo de amostras da imagem com ambas as correções (temperatura de superfície) em relação aos demais grupos; b) Grupo de amostras da imagem sem qualquer correção (temperatura aparente) em relação aos demais grupos.

4. Considerações finais

O aumento da distribuição de dados de sensores termais, bem como o aprimoramento da tecnologia destes sensores, tem favorecido estudos focados no entendimento de climas urbanos através da análise do comportamento da temperatura de superfície. A conversão mais adequada da radiação para temperatura de superfície considera os efeitos atmosféricos e da emissividade dos materiais, pois parte de princípios físicos de balanço energético que descrevem os fenômenos térmicos entre a atmosfera e a superfície terrestre. O modelo de correção atmosférica e de emissividade proposto por Barsi (2003) adotado neste trabalho produziu resultados de TST que demonstram o impacto significativo desses tipos de correção sobre produtos de temperatura de superfície.

Sob uma perspectiva de se investigar separadamente a influência de cada correção sobre as estimativas de TST, foi identificado que, para a área de estudo utilizada, a correção pelos efeitos atmosféricos se mostrou mais significativa, produzindo uma diferença média entre a temperatura aparente e a TST de 5,0 °C e 5,8 °C nas áreas urbanas e de solo exposto, respectivamente. Também nestas áreas observou-se que a correção pela emissividade da superfície, é, em geral, menos expressiva sobre os valores de temperatura. Sobre a aplicação integral do modelo analisado, observou-se um aumento médio de 5 °C na temperatura após a correção da atmosfera e pela emissividade média dos alvos, sendo notado em algumas áreas da imagem um aumento efetivo de até 10 °C.

Ao analisar a diferença estatística entre as imagens com diferentes níveis de correção através do teste de Kruskal-Wallis e de comparação múltipla, observou-se que a imagem que recebeu apenas a correção pela emissividade não se distingue significativamente da que não recebeu qualquer correção. Através destas análises estatísticas foi possível constatar que a imagem que recebeu a aplicação integral do modelo de correção é significativamente diferente das demais ao nível de confiança de 95%, ressaltando a importância destes procedimentos de correção nas imagens termais às quais se pretenda utilizar para estimar temperatura de superfície.

É notável que essa diferença se deu sobretudo em áreas de solo exposto e uso urbano, o que evidencia a importância destes tipos de correções para estudos que visam observar dinâmicas nas temperaturas de superfície geradas a partir de mudanças no uso do solo (área de vegetação para área urbana, por exemplo). Isso porque, como demonstrado nos resultados apresentados, a não correção destes parâmetros pode subestimar os dados de temperatura de superfície levando a conclusões errôneas sobre o efeito dessas mudanças no clima local.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, L. do L. **Estimativa de temperatura e emissividade com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System) e suas relações com materiais urbanos**. São José dos Campos, SP: INPE, 2011. 128 f. (INPE-16962-TDI/1843). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- BARSI, J.A., J.L. BARKER, J.R. SCHOTT. **An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument**. IGARSS03, 21-25 July 2003, Centre de Congres Pierre Baudis, Toulouse, France.
- DIAS, M. B. G.; NASCIMENTO, D. T. F. Clima urbano e ilhas de calor: aspectos teórico-metodológicos e estudo de caso. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 12, pp. 27-41, 2014. Disponível em: <http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/download/902/926>. Acesso em: 25 novembro 2015.
- JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2006. 592 p.
- MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IG/USP, 1976.
- MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. 2ª Edição. São Paulo: Contexto, 2011. 192 p.
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.
- REES, W. G. **Physical principles of remote sensing**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 369 p.
- VOOGT, J. A., OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates, **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n 3, p. 370–384, 2003.