

Aplicação do método TES em imagem termal de alta resolução espacial

Leidiane do Livramento Andrade
Roberto Neves Salles
Ruy Morgado de Castro

Instituto de Estudos Avançados - IEAv/DCTA
Caixa Postal 6044 – 12.231-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
{leidiane.andrade; salles; rmcastro}@ieav.cta.br

Abstract. The aim of this work is comparing the values of surface temperature and spectral emissivity for some materials of interest with two methods: NOR and TES. In addition, estimate the absolute spectral emissivity through the TES method. It was found that the surface temperature estimated by TES method was systematically lower than the value obtained by the NOR method around 1.0 °C. It was also observed that the spectral emissivity estimated by NOR and TES were similar for different materials for all TIR bands. Comparing the histograms of TIR bands for data emissivity, it was found that the methods do not significantly alter the absolute distribution of emissivity on the images and the bands are correlated.

Palavras-chave: infrared thermal, surface temperature, spectral emissivity, infravermelho termal, temperatura de superfície, emissividade espectral.

1. Introdução

O estudo das características térmicas dos materiais presentes na superfície terrestre é de grande relevância devido aos impactos ambientais gerados pela substituição de materiais naturais por artificiais. Uma forma de realizar este tipo de análise é o uso de sensoriamento remoto, que pode proporcionar medidas radiométricas da área de interesse em sua totalidade e ao mesmo tempo, o que seria muito difícil e caro realizar por outros meios, como medidas em campo, principalmente em áreas extensas.

Entretanto, a radiância termal é por natureza indeterminada devido à relação entre a temperatura e a emissividade de uma determinada superfície, ou seja, para sensores com n bandas no Infravermelho termal, ou *Infrared Thermal* – TIR, existem n equações com $n+1$ incógnitas, porque ao medir a radiância nas n bandas não é possível obter n emissividades espectrais além da temperatura de superfície (Gillespie et al., 1998). Por este motivo, para estimar a temperatura de superfície é preciso medidas de campo ou utilizar algum método que estabeleça uma relação entre a emissividade e a temperatura.

Neste trabalho, foram aplicados dois métodos de separação da temperatura e emissividade: o Método de Normalização da Emissividade, ou *Emissivity Normalization Method* – NOR (Gillespie et al., 1998) e o Método de Separação de Temperatura e Emissividade, ou *Temperature and emissivity separation* – TES (Gillespie et al., 1999), utilizando imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial nos comprimentos de onda do infravermelho termal, com o objetivo de comparar os valores de temperatura e a forma do espectro da emissividade para alguns materiais de interesse, além de estimar a emissividade absoluta por meio do método TES.

2. Materiais e Métodos

Foi utilizada uma imagem do sistema sensor *Hyperspectral Scanner System* – HSS, obtida por meio do imageamento realizado sobre a cidade de São José dos Campos no dia 30/05/06 às 21h. A altitude do voo foi de 1736 metros e a altura em relação ao solo de 1090 m, o que determinou a resolução espacial da imagem em 2,7 m (para um Campo de Visada Instantâneo, ou *Instantaneous Field Of View* - IFOV de 2,5 mrad).

Este sistema sensor possui 13 bandas distribuídas pelos comprimentos de onda do Infravermelho Médio e Termal (Moreira, et al., 2004), entre 3,0 e 15,0 μm , além de outras 37 bandas distribuídas ao longo das regiões visível e infravermelho próximo.

Para este trabalho foram utilizadas 6 bandas (bandas 45 a 50), nos comprimentos de onda de 8 a 12,5 μm , as quais foram convertidas de números digitais para radiância segundo a metodologia utilizada por Andrade, et al. 2012. Em seguida, foram corrigidas para os efeitos da atmosférica utilizando o aplicativo PCModWin/MODTRAN e dados da estação meteorológica localizada no Aeroporto de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf (Andrade et al., 2012).

Sabendo que a Equação 1 descreve a radiância medida pelo sensor numa dada banda, que é uma função da emissividade, ε_{med} , e da temperatura, T_{med} , além da exitância de corpo negro, BB , da função de resposta do sensor, FRE , do comprimento de onda, λ , e transmitância atmosférica, τ .

$$L_{med,b}(T_{med}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{BB_b(T_{med}, \lambda)}{\pi} \cdot FRE_b(\lambda) \cdot \tau \cdot \varepsilon_{med}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Portanto, uma vez obtidas imagens em radiância corrigida para os efeitos da atmosfera foram utilizados os métodos NOR e TES para estimar a temperatura e a emissividade dos materiais que compõe a cena.

2.1 Método NOR

O método NOR normaliza a emissividade, ε_{NOR} , para o valor definido como o máximo valor de emissividade, ε_{max} , que se espera encontrar nas imagens TIR. Assim, assumindo que $\varepsilon_{NOR} = \varepsilon_{max}$ para todas as bandas, é possível determinar a temperatura de cada pixel para cada banda, $T_{NOR,b}$, (CASELLES, et al., 1999), determinando a temperatura para que a exitância de corpo negro em uma dada banda, BB_b , seja igual a radiância proveniente do alvo, Equação 2:

$$BB_b(T_{NOR}, \lambda) = \frac{L_{med,b}(1 - \varepsilon_{NOR})I_{atm,b}}{\varepsilon_{NOR}} \quad (2)$$

onde: $L_{med,b}$ é a radiância medida em cada banda, $I_{atm,b}$ é a irradiância atmosférica descendente em cada banda.

Em seguida, é verificado qual o valor máximo da temperatura, para um mesmo pixel, dentre os estimados nas várias bandas. Este valor máximo é definido como a temperatura de superfície, T_s , que é, então, utilizada para recalcular a emissividade dos pixels em cada banda, ε_b , Equação 3.

$$\varepsilon_b = \frac{L_{med,b}}{BB_b(T_s)} \quad (3)$$

2.2 Método TES

O método TES combina três métodos para realizar a separação da temperatura e emissividade absoluta: 1) *Normalized emissivity method* - NEM; 2) *Ratio method* - RAT; 3) *Minimum Maximum Difference* - MMD.

O método NEM estima a temperatura e a emissividade das bandas da mesma forma que o método NOR, utilizando como dado inicial a emissividade máxima definida pelo usuário. A diferença entre estes dois métodos é que o NEM realiza sucessivas iterações (até 12 vezes ou até que a diferença entre a radiância estimada na iteração anterior, L' , e na iteração atual, L'' , seja menor que $0,05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$) para corrigir a influência da irradiância atmosférica descendente refletida ($(1-\varepsilon_{\text{NOR}})I_{\text{atm},b}$) na radiância medida pelo sensor, Equação 4. Entretanto, neste trabalho não será utilizada esta forma de correção atmosférica. Por tanto, o método NOR poderá ser comparado com o método TES porque ambos não têm a componente iterativa de correção atmosférica.

$$L'' = L' - (1 - \varepsilon)I_{\text{atm},b} \quad (4)$$

O próximo passo é a normalização das emissividades pelo seu valor médio no método RAT. Para tal é estimada a emissividade relativa (β_b) à emissividade média das bandas para cada banda, Equação 5.

$$\beta_b = \varepsilon_b \cdot n(\Sigma\varepsilon_b)^{-1} \quad (5)$$

onde: n é o número de bandas

Em seguida é utilizado o método MMD para estimar a temperatura e a emissividade finais. Para tal é estimado o contraste espectral das emissividades relativas, Equação 6.

$$MMD = \max(\beta_b) - \min(\beta_b) \quad (6)$$

onde: MMD é o contraste espectral

Depois é estimada a emissividade mínima, ε_{min} , por meio do MMD e comportamento espectral da emissividade de materiais obtidos em biblioteca espectral que são utilizados para estimar os coeficientes a , b e c para o sensor, Equação 7.

$$\varepsilon_{\text{min}} = a + [b \cdot (MMD)^c] \quad (7)$$

Por último, é estimada a emissividade absoluta TES para cada banda, $\varepsilon_{\text{TES},b}$, e a temperatura TES, T_{TES} , Equação 8 e 9.

$$\varepsilon_{\text{TES}} = \beta_b \left(\frac{\varepsilon_{\text{min}}}{\min(\beta_b)} \right) \quad (8)$$

$$T_{\text{TES}} = \frac{c2}{\lambda_b \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{c1}{\pi \cdot BB_{\text{TES},b} \cdot \lambda^5} \right) \right]} \quad (9)$$

onde: $C1$ é a primeira constante da radiação cuja equação é $2\pi \cdot h \cdot c^2$ e seu valor aproximado é $(3,74 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2)$, h é a constante de Planck cujo valor aproximado é $6,63 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$, c é a velocidade da luz cujo valor aproximado é $2,99 \times 10^{18} \text{ m/s}$, $C2$ é a segunda constante da radiação cuja equação é $h \cdot c/k$ e seu valor aproximado é $1,44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, k é a constante de Boltzmann cujo valor aproximado é $1,38 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s/K}$, $BB_{\text{TES},b}$ é a exitância de corpo negro para o método TES em cada banda.

3. Resultados e Discussões

A partir das imagens em radiância, corrigidas para os efeitos da atmosfera, para as bandas 45 a 50 do Sensor HSS, foram obtidas as imagens em emissividade e temperatura pelo método NOR e TES. Para avaliar o comportamento da emissividade espectral, obtida pelos métodos NOR e TES, foram utilizados os mesmos 200 pixels dos materiais típicos/interesse. Assim, devido ao número de pixels extraídos para cada um dos materiais, calculou-se a média e o desvio padrão da média, σ_m , da emissividade em cada banda. Os resultados obtidos para a emissividade espectral de alguns dos materiais selecionados podem ser observados na Figura 1.

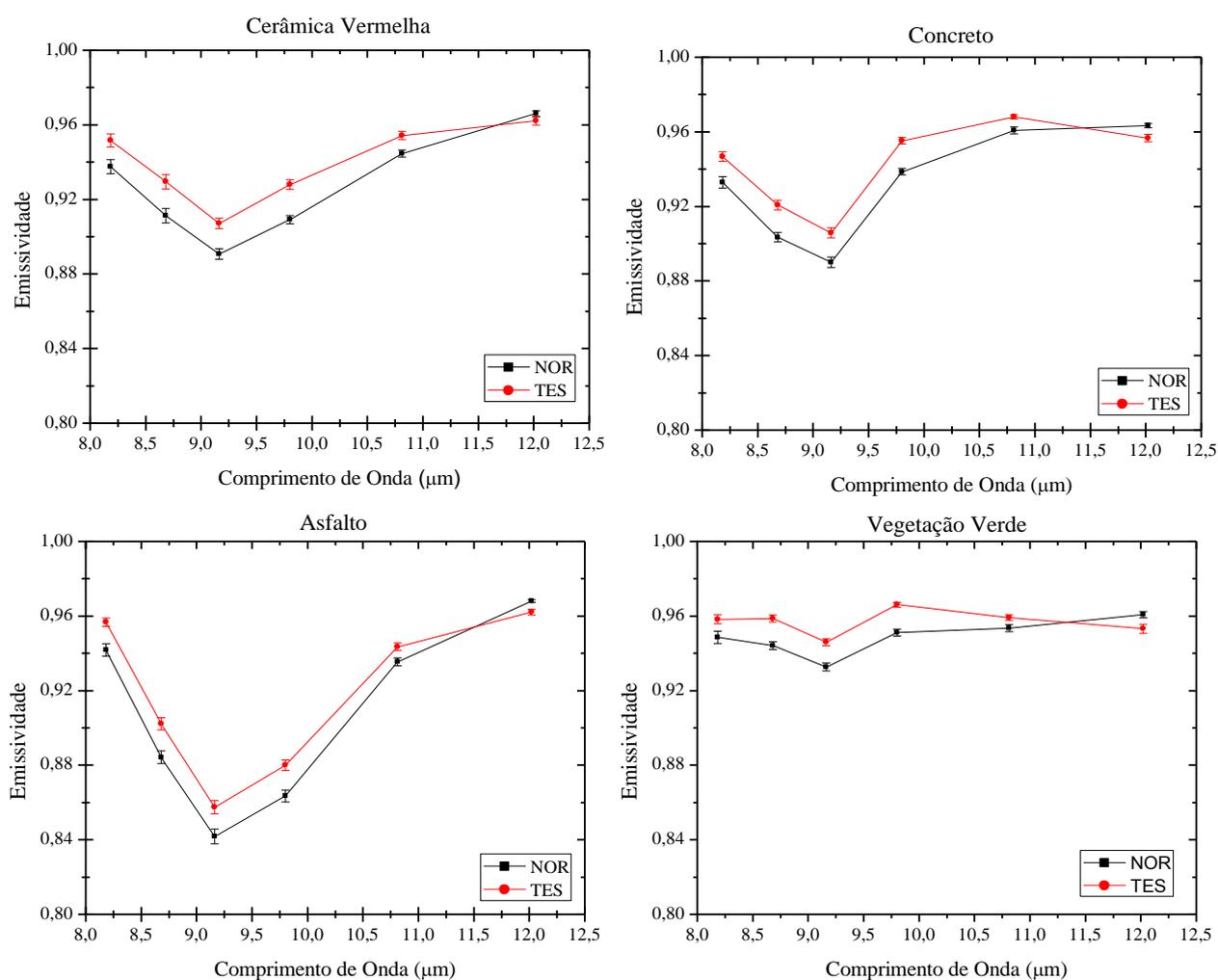


Figura 1: Comparação do comportamento espectral da emissividade de materiais para as bandas do Sensor HSS.

No geral, as formas dos espectros de emissividade dos mesmos materiais, obtidas pelos dois métodos, foram semelhantes. Muito embora tenha sido obtida a emissividade absoluta com o método TES, não foi possível fazer uma comparação direta entre os valores de emissividade porque a emissividade obtida com o método NOR é relativa à emissividade inicial máxima definida pelo operador. Para realizar uma comparação direta dos valores de emissividade, é necessário outro método que estime a emissividade absoluta, ou a medição da emissividade em campo.

Também foram avaliados os histogramas das bandas para o material asfalto (Figura 2) com o objetivo de verificar a frequência absoluta dos dados de emissividade.

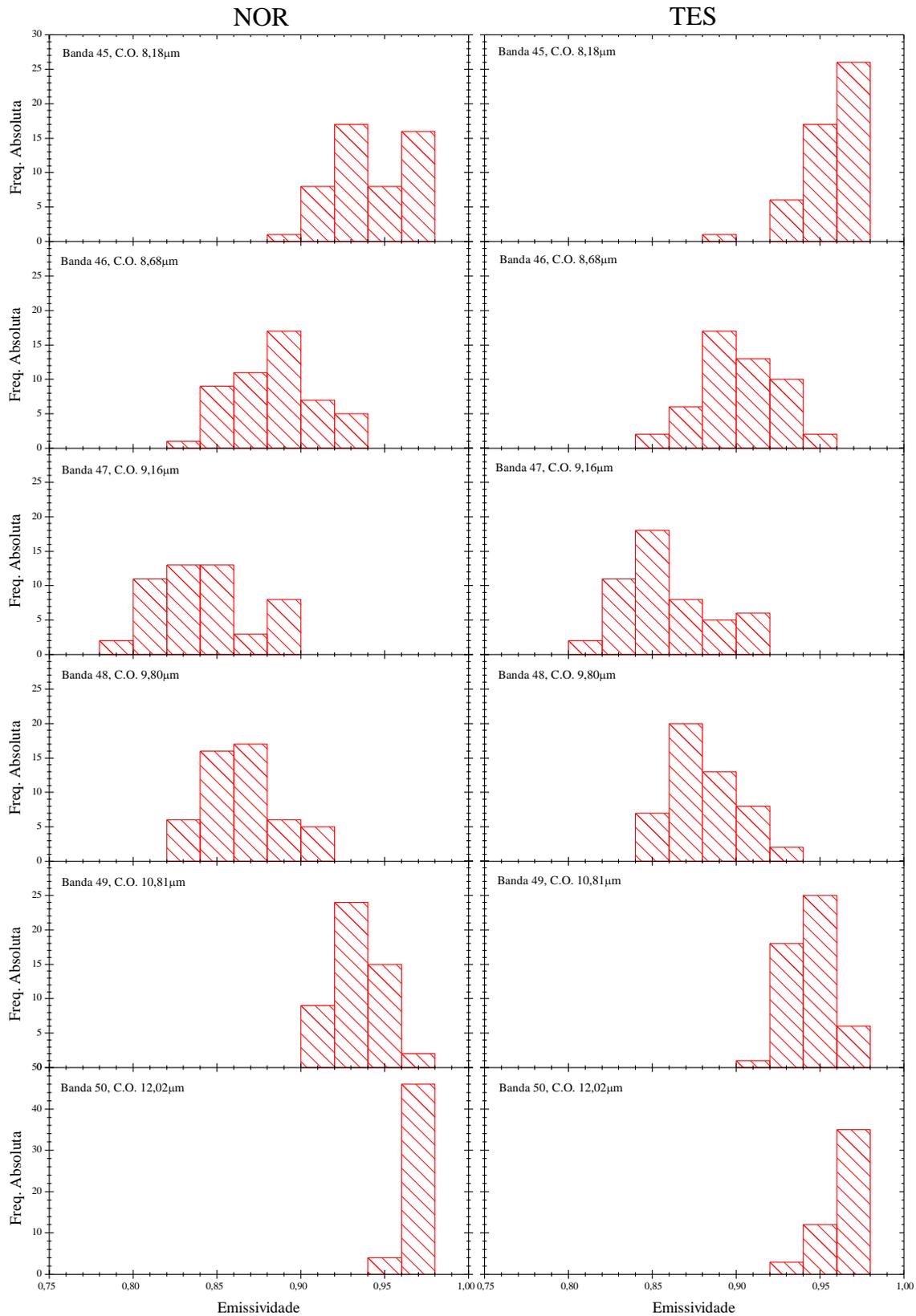


Figura 2: Comparação de histogramas de emissividade das bandas TIR do Sensor HSS para os métodos NOR e TES.

Observou-se a existência de diferenças de amplitude e simetria entre os histogramas da banda 45 e mudanças mais sutis na banda 50, cujos comprimentos de onda central são 8,18 e 12,02 μm , respectivamente. Estas diferenças provavelmente são devido às aproximações que os métodos fazem com a emissividade inicial. Nesta aproximação, geralmente a banda 50, no comprimento de onda em 12,02 μm , apresenta os maiores valores de emissividade para a maioria dos pixels. As demais bandas apresentaram amplitude e simetria semelhantes para ambos os métodos.

Além disso, com objetivo de continuar verificando se as emissividades estimadas pelos dois métodos eram compatíveis entre si, foi avaliada a correlação das emissividades para um pixel pelos dois métodos, para o material asfalto. Verificou-se que estas são correlacionadas evidenciando assim a semelhança das metodologias de estimativa de emissividade, Figura 3.

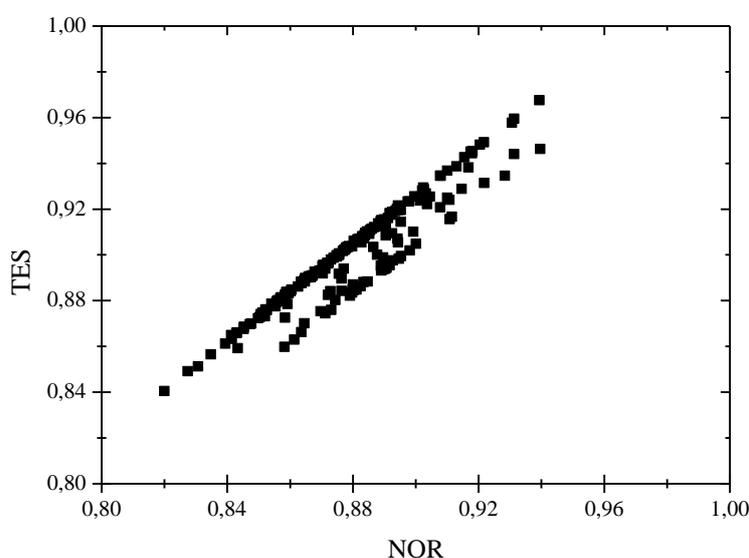


Figura 3: Correlação da emissividade. Exemplo da banda 46, no comprimento de onda 8,68 μm .

Para comparar diferença entre as temperaturas obtida pelos métodos NOR e TES, foram selecionados 200 pixels para os alguns materiais típicos/interesse: vegetação verde, asfalto, cerâmica vermelha e concreto. Assim, foram determinados: a média da temperatura, o desvio padrão, σ , e o desvio padrão da média, σ_m , (Tabela 1).

Tabela 1: Comparação da Temperatura de Superfície.

Material	NOR ($^{\circ}\text{C}$)			TES ($^{\circ}\text{C}$)		
	média	σ	σ_m	média	σ	σ_m
Asfalto	20,37	0,92	0,13	19,20	0,88	0,12
Cerâmica Vermelha	15,11	1,28	0,18	14,09	1,43	0,20
Concreto	22,03	0,61	0,09	21,00	0,54	0,08
Vegetação Verde	18,58	0,71	0,10	17,77	0,60	0,09

De uma maneira geral os resultados foram semelhantes aos obtidos anteriormente (Andrade, et.al. 2012), entretanto verificou-se que a temperatura de superfície estimada pelo método TES foi sistematicamente inferior ao valor obtido pelo método NOR em torno de 1,0 $^{\circ}\text{C}$. O desvio padrão foi menor do que o estimado anteriormente para o método NOR, devido ao tamanho da amostra dos materiais e, conseqüentemente, sua variabilidade. Esta diferença de 1,0 $^{\circ}\text{C}$ está dentro da incerteza estimada para a temperatura de superfície anteriormente (Andrade, et.al. 2012) que é de aproximadamente 1,8 $^{\circ}\text{C}$.

5. Conclusões

Este trabalho apresenta a comparação entre dois métodos na estimativa da temperatura de superfície e comportamento espectral da emissividade. Verificou-se que a temperatura de superfície estimada pelo método TES foi sistematicamente inferior ao valor obtido pelo método NOR em torno de 1,0 °C. Também foi observado que o comportamento espectral da emissividade estimado pelos dois métodos para diferentes materiais foi semelhante para todas as bandas TIR do Sensor HSS. Comparando os histogramas das bandas TIR para os dados de emissividade, constatou-se que os métodos não alteraram significativamente a distribuição absoluta da emissividade nas imagens e que as bandas são correlacionadas. Pela primeira vez foi estimada a emissividade absoluta de materiais de interesse utilizando um sensor remoto de alta resolução espacial no Brasil, entretanto, não foi possível comparar estes valores com dados de emissividade obtidos em campo. O mesmo ocorre com a temperatura de superfície, embora tenha sido obtida a temperatura de superfície, não foi possível comparar com dados obtidos em campo.

Referências

Andrade, L.L.; Galvão, L. S.; Castro, R. M. Conversão dos números digitais de imagens TIR do sensor HSS para radiância e estimativa da temperatura e emissividade. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.64 v.4, p.487-502, 2012. ISSN: 1808-0936.

Andrade, L.L.; Galvão, L. S.; Castro, R. M. Conversion of Digital Numbers of the HSS Sensor TIR Images into Radiance: Uncertainty Evaluation. **Proceeding**. 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Florianopolis-SC, Brazil, July 10-13, p.61-66, 2012.

Caselles, V.; Coll, C.; Rubio, E.; Valor, E.; Sospedra, F. Medida de la temperatura y la emisividad con datos multiespectrales del sensor DAIS. In.: Congreso Nacional de Teledetección, 10, 1999, Albacete. **Proceedings...** Espanha: Teledetección: Avances y Aplicaciones, 1999, p.343-346.

Gillespie, A.; Rokugawa, S.; Matsunaga, T.; Cothorn, J. S.; Hook, S. J.; Kahle, A. B. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n. 4, p. 1113-1126, 1998.

Gillespie, A. R.; Rokugawa, S.; Hook, S. J.; Matsunaga, T.; Kahle, B. Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4, contract NAS5-31372, Natl. Aeronaut. and Space Admin., Washington, D. C., 1999. Disponível em: <http://terrast.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/en/documnts/pdf/2b0304.pdf> . Acesso em 05 ago 2014.

Moreira, R.C.; Castro, R.M; Esposito, E.S.C.; Lucca, E.V.D. Sensor hiperespectral HSS: sumário das características técnicas. In.: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 12., Goiânia, 2005. **Anais**. São José dos Campos: INPE, p. 4517-4524. 2004.

ONTAR. PcModWin - Overview [**on line**]. Ontar Corporation. Disponível em: <http://www.ontar.com/Software/ProductDetails.aspx?item=PcModWin> Acesso em: set, 2011.