

Técnica de desagregação para a melhoria da resolução espacial da banda termal do sensor MODIS

Morris Scherer-Warren¹

Lineu Neiva Rodrigues²

Nestor Aldo Campana³

¹Agência Nacional de Águas – ANA
SPO, Área 5, Quadra 3, CEP 70610-200, Brasília-DF, Brasil
morris@ana.gov.br

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA
Caixa Postal 08223, CEP 73310-970, Planaltina-DF, Brasil
lineu@cpac.embrapa.br

³Universidade de Brasília – UNB
Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil
mnestor@unb.br

Abstract. Land surface temperature is a key variable in environmental studies and the monitoring of global changes. Currently the availability of fine spatial resolution thermal infrared sensors is limited in the actual polar satellite constellation. This represents limitations in local applications such as agricultural management and hydrological modeling. This paper presents a new procedure for disaggregating the MODIS 1 km thermal band to 500 meters' resolution. To execute the thermal sharpening procedure, different vegetation indexes were tested, especially those sensitive to surface soil moisture. Results show that the proposed algorithm is able to satisfactorily disaggregate surface temperature to 500 meters' resolution. Ten combinations of vegetation indexes resulted in determination coefficients between 0.89 and 0.94, and the errors at one standard deviation were less than 1° K for all models.

Palavras-chave: resolução espacial, temperatura, MODIS, sharpening, thermal, emissivity

1. Introdução

A temperatura superficial é uma variável chave em estudos ambientais e de mudanças globais. As aplicações possíveis são inúmeras, incluindo a estimativa de evapotranspiração e do balanço de energia sobre a superfície terrestre, a caracterização de estresse hídrico de plantas e seu desenvolvimento fenológico, o monitoramento de estiagens e a identificação de queimadas (Gowda et al., 2007 ; Kalman et al., 2008; Moran 2003). A única forma factível para o monitoramento da temperatura superficial em grandes extensões é por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Na atual geração de satélites, entretanto, as opções de sensores termais são restritas em relação a frequência de imageamento e a resolução espacial, representando limitações em aplicações de escala local, tais como manejo agrícola e modelagem hidrológica. As opções atuais são de sensores de média resolução espacial e baixa resolução temporal (LANDSAT, ASTER); ou sensores de baixa resolução espacial e alta resolução temporal (MODIS, AVHRR).

Especificamente em se tratando de técnicas de inversão de modelos solo-vegetação-atmosfera é desejável estimativas de temperatura frequentes (diárias) e com média resolução

espacial (~100 a 500 metros dependendo da localidade). A melhoria da resolução espacial é desejável para que seja possível se estabelecer uma relação bi-unívoca entre a observação do satélite e o alvo sobre a superfície terrestre.

A melhoria da resolução espacial da banda termal pode ser obtida por meio de técnicas estatísticas e de análise espacial, genericamente denominadas de *thermal sharpening* (Kustas, 2003; Agam et al., 2007; Mukherjee, 2008; Liu e Pu, 2008, Merlin et al., 2010). No presente trabalho, o termo desagregar é adotado como equivalente ao termo inglês *sharpening*, ou o procedimento para melhorar a resolução espacial de uma superfície numérica qualquer.

Para a desagregação da temperatura superficial é necessário a utilização de parâmetros e/ou variáveis auxiliares (denominados de p.v. auxiliares); no qual são considerados parâmetros as características sobre a superfície da terra que afetam a temperatura (ex. cobertura vegetal), enquanto variáveis são mudanças de estado que afetam igualmente a temperatura superficial (ex. umidade do solo). Exemplos de p.v. auxiliares frequentemente utilizados em procedimentos de desagregação da banda termal incluem o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI (Kustas et al., 2003) e a Fração Vegetada – FV (Agam et al., 2007).

A justificativa por trás da utilização do índice de vegetação no processo de desagregação, além da evidente correlação com a temperatura, é que a informação radiométrica necessária para seu cálculo em média resolução espacial (visível, infra-vermelho próximo e médio) é comumente encontradas em diferentes plataformas de sensoriamento remoto. O próprio sensor MODIS possui estas bandas com resolução espacial de 500 e 250 metros.

Muitos dos índices de vegetação são sensíveis a presença de água, principalmente aqueles índices que utilizam a faixa espectral do infravermelho médio. Mira et al. (2007) destacam que uma das pendências atuais ligadas ao sensoriamento remoto termal é não considerar a umidade no solo nas estimativas de emissividade da superfície, apesar de se conhecer experimentalmente que existe tendência de aumento da emissividade em função da presença de água. Até onde se tem conhecimento, os índices de vegetação sensíveis à umidade nunca foram utilizados em procedimentos de desagregação de temperatura.

Desta forma, neste trabalho foi desenvolvido um procedimento para melhoria da resolução espacial da banda termal do sensor MODIS (1 km) para a resolução de 500 metros. O procedimento de desagregação foi desenvolvido considerando as características espectrais e geométricas do sensor MODIS, especificamente a utilização de p.v. auxiliares sensíveis à umidade superficial. Espera-se com este trabalho contribuir para a construção de séries temporais de temperatura superficial com média resolução espacial.

Para o desenvolvimento do procedimento de desagregação foi utilizado o sensor TM do satélite LANDSAT, pois este possui banda termal com resolução espacial suficientemente boa (120 metros) para simular todas as resoluções disponíveis do sensor MODIS. A banda termal no caso do sensor MODIS está disponível apenas para a resolução de 1 km. Ao simular o sensor MODIS, foi possível obter a imagem termal na resolução adicional de 480 metros, utilizada para a validação do procedimento de desagregação.

2 Metodologia de Trabalho

2.1 Pré-processamento

Inicialmente foi selecionada uma imagem do satélite LANDSAT-5 para a Bacia do Rio Preto, localizada em Brasília-DF, com órbita ponto 221/71 e data de 6 de maio de 2000. Os valores digitais das bandas 1-5 e 7 do sensor TM foram transformados para reflectância de superfície. Para converter os valores digitais das imagens para radiância foi utilizado os

valores de radiância mínima e máxima do sensor TM fornecidos por Chandler e Merkhham (2003). Os valores de radiância foram transformados para reflectância por meio da equação 1, desta forma, normalizando as imagens em função do ângulo zenital e irradiância solar.

$$\rho = \frac{\Pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \quad (1)$$

no qual ρ = reflectância; L_{λ} = radiância; d^2 = distância Sol – Terra; $ESUN_{\lambda}$ = irradiância solar; $\cos \theta_s$ = cos seno do ângulo zenital.

Para calcular a reflectância de superfície, os efeitos atmosféricos foram removidos pela aplicação do código de transferência radiativa MOTRAN, conforme implementado no módulo ATCOR do ERDAS Imagine. Em função da ausência de informação meteorológica, os parâmetros atmosféricos foram estimados interativamente por meio da análise do comportamento espectral de superfícies conhecidas, como água, solo exposto e vegetação.

A temperatura superficial (T_s) foi calculada para a banda 6 do sensor TM usando a equação de Planck conforme a proposta de Markham e Barker (1986):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln[\varepsilon_{NB} K_1 / R_c] + 1} \quad (2)$$

no qual ε_{NB} = emissividade de da superfície correspondente a banda termal do sensor; R_c = a radiação termal da superfície corrigida dos efeitos atmosféricos; K_1 e K_2 = constantes específicas do sensor TM.

A emissividade na equação 2 foi considerada constante em toda a superfície (emissividade = 0.975). Os efeitos atmosféricos sobre a radiância da banda termal foram corrigidos usando o modelo de transferência radioativa MODTRAN e os perfis atmosféricos derivados do modelo climático do NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*, conforme implementação de Barsi et al.(2003).

2.2 Parâmetros-variáveis auxiliares para desagregação da temperatura

Para realizar a desagregação da temperatura, foram selecionados dois parâmetros de vegetação (1 e 2) e duas variáveis sensíveis a umidade superficial (3 e 4): (1) o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI; (2) a Fração Vegetada – FV (Choudhury et al., 1994); (3) o Índice de Umidade por Diferença Normalizada - NDWI (Gao, 1996); e (4) a componente *Wetness* da transformação *Tasseled Cap* – TCW (Kauth e Thomas, 1976; Crist e Ciconne, 1984).

2.3 algoritmo de desagregação da banda termal

A maioria dos algoritmos de desagregação se difere principalmente na determinação da relação (função) entre a temperatura e o p.v. auxiliar. No presente trabalho foi elaborada uma proposta baseada em mínimos quadrados (figura 1). Inicialmente é realizada a regressão linear entre a temperatura da imagem de baixa resolução (960 metros) e a p.v. auxiliar de em

melhor resolução (480 metros) – figura 01. Esta estimativa é obtida por mínimos quadrados considerando toda a imagem, ou seja, trata-se de uma estimativa **global** para a área de estudo.

A esta estimativa inicial (temperatura de 480) é imposta uma restrição de preservação dos valores de temperatura da menor escala (960 metros), ou seja, o valor de temperatura observado na imagem de baixa resolução espacial pode ser novamente obtido ao realizar a média da temperatura da imagem desagregada. Isto é realizado em três etapas: 1. inicialmente obtêm-se a média da estimativa de temperatura de todos os sub-pixels dentro do pixel de 960 metros; 2. o valor de temperatura observado na escala de 960 metros (imagem original) é subtraído da estimativa de temperatura agregada na etapa 1; 3. a diferença obtida na etapa 2 (positiva ou negativa) é adicionada a cada um dos sub-pixel. Esta estimativa da temperatura normalizada (temperatura estimada de 480 metros com adição de erro) substitui a imagem de temperatura original de 960 metros. O procedimento se repete de forma iterativa até o ponto em que não haja incremento no valor de correlação com o p.v. auxiliar.

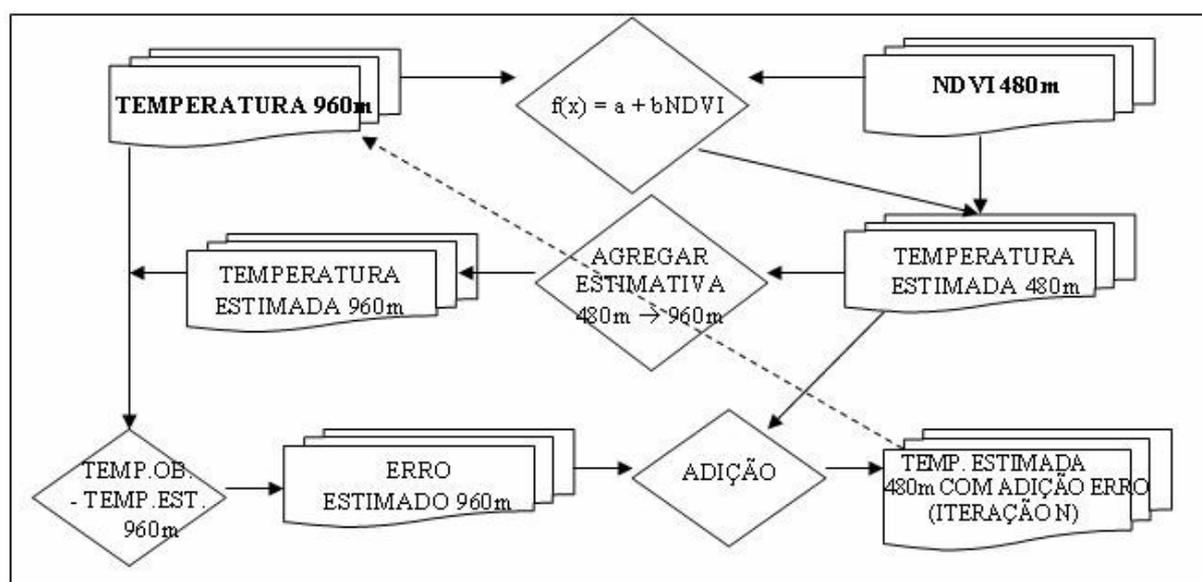


Figura 1. Fluxograma de processamento do algoritmo global de desagregação da banda termal

Desta forma, as imagens Landsat foram degradadas para simular o sensor MODIS nas resoluções de 960 metros (banda termal) e 480 metros (bandas visíveis e infravermelho próximo e médio). A imagem termal com 120 metros de resolução também foi degradada em diferentes resoluções espaciais (480 e 960 metros), sendo a imagem termal de 960 metros objeto do procedimento de desagregação, e a imagem de 480 metros utilizada para validar a estimativas desagregadas.

O modelo global foi aplicado para a resolução de 480 metros com 10 combinações diferentes de índices de vegetação e umidade: 1. NDVI; 2. FC; 3. NDWI; 4. TCW; 5. NDVI + TCW; 6. NDVI + NDWI; 7. NDVI + NDWI + TCW; 8. FC + TCW; 9. FC + NDWI; 10. FC + NDWI + TCW.

3 Resultados e Discussão

Os resultados da aplicação do algoritmo global para diferentes combinações de p.v. auxiliares são mostrados na tabela 1. O alto valor do coeficiente de determinação evidencia que todos os modelos são satisfatórios ($0.89 < R^2 < 0.94$). Considerando-se as p.v. auxiliares

isoladamente, a que resultou a melhor correlação foi a TCW, evidenciando o potencial de utilização deste índice de umidade na desagregação da temperatura superficial.

As correlações também tendem a aumentar ao considerar os modelos multivariados, o que evidencia a informação complementar presente em cada uma das p.v. auxiliares consideradas. O NDVI evidencia a presença da vegetação (biomassa), que por sua vez possui características de emissividade diferentes de uma área de solo exposto. A TCW é menos sensível a presença de vegetação comparativamente ao NDWI, o que resulta em um índice de umidade de aplicação mais geral, tanto para vegetação como para solo exposto. O NDWI é sensível a presença de água no dossel das plantas (Gao, 1996), sendo este índice adequado para diferenciar diferentes níveis de estresse hídrico das plantas e, por consequência, a temperatura do dossel (Moran, 2003).

O erro padrão (erro a 1 desvio-padrão) é inferior a 1° K em todos os modelos (tabela 1), sendo 0.71° K no casos dos dois melhores modelos. Conforme pode ser observado na figura 3, a relação entre a temperatura desagregada e a temperatura observada é linear, não havendo grande dispersão e presença de “outliers”. A inspeção visual da superfície de temperatura desagregada do melhor modelo (NDVI/NDWI/TCW) também permite constatar que há uma boa correspondência com a superfície observada (figura 2).

Tabela 1. Ajuste dos modelos globais e erro padrão (480 metros)

MODELOS DESAGREGAÇÃO 480m				
	erro padrão	correlação	determinação	teste F
NDVI	0.866	0.956	0.914	F (1;17626) = 81664
FC	0.903	0.952	0.906	F (1;17626) = 74350
TCW	0.812	0.961	0.924	F (1;17626) = 112374
NDWI	0.968	0.944	0.892	F (1;17626) = 61398
NDVI+TCW	0.778	0.964	0.930	F (2,17625) = 63047
NDVI+NDWI	0.869	0.955	0.913	F (2;17625) = 41954
NDVI+NDWI+TCW	0.709	0.971	0.942	F (3;17624) = 48228
FC+TCW	0.785	0.964	0.929	F (2;17625) = 62222
FC+NDWI	0.901	0.952	0.906	F (2;17625) = 38912
FC+NDWI+TCW	0.706	0.971	0.942	F (3;17624) = 48671

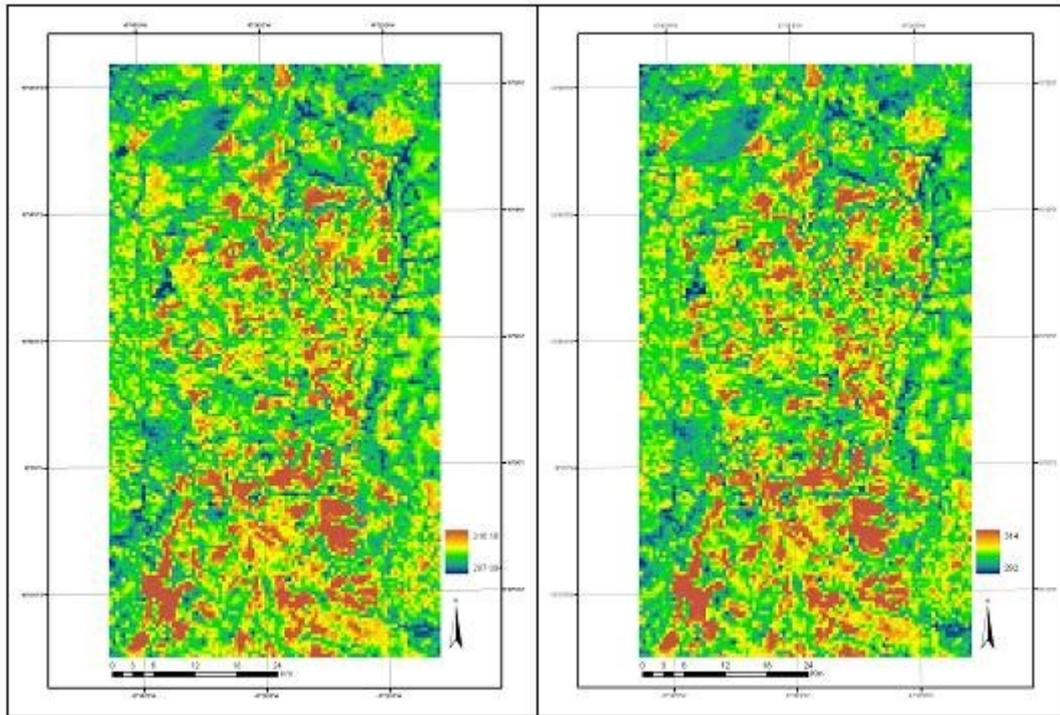


Figura 2. Superfície de temperatura observada (a) e estimada com os p.v.s NDVI, NDWI e TCW(480 metros)

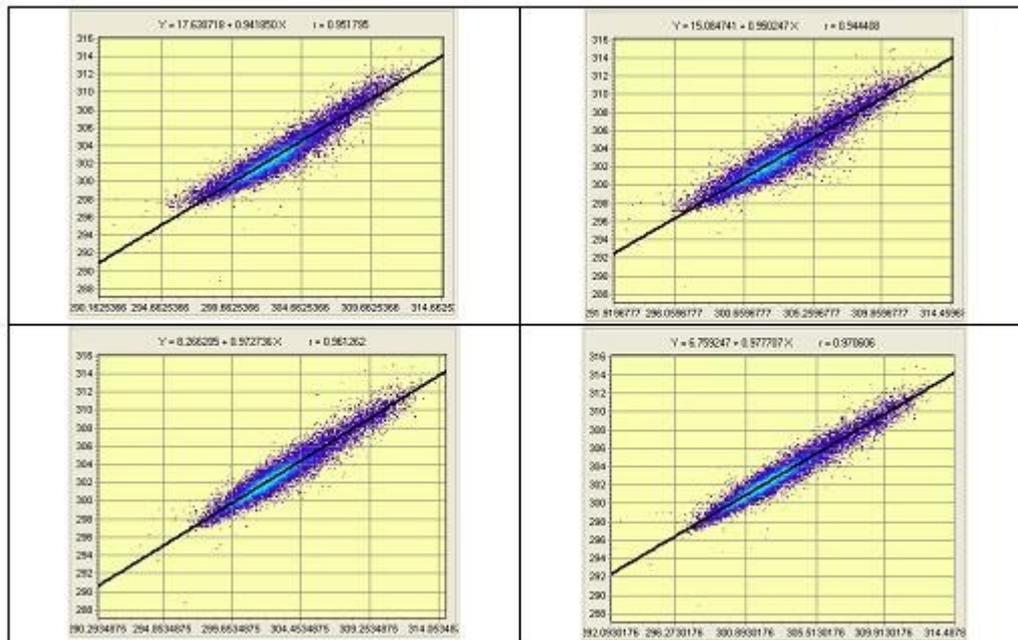


Figura 3. Gráfico de dispersão entre a temperatura observada e estimada (480 m) com (a) NDVI; (b) NDWI; (c) TCW; (d) NDVI, NDWI e TCW

4. Conclusões

Os resultados apresentados permitem constatar a efetividade das técnicas de desagregação. A utilização de índices de umidade como p.v. auxiliares no processo de desagregação se mostrou acertada, principalmente em relação a componente *Wetness* da transformação *Tasseled Cap*, sendo que esta variável apresentou melhor correlação com a temperatura do que o tradicionalmente utilizado NDVI. Pelo que é de conhecimento dos autores, os índices de umidade nunca haviam sido utilizados em procedimentos de desagregação de temperatura.

Os múltiplos p.v. utilizados (NDVI, NDWI e TCW) possuem informação complementar, de forma que existe ganho ao incorporar todos os p.v. auxiliares no modelo de desagregação. Possivelmente a introdução de outros p.v.s auxiliares, ou mesmo o aprimoramento dos p.v. auxiliares utilizados, poderia auxiliar na diminuição dos erros de estimativa. De acordo com Gao (1996), o NDWI é sensível a todo o conteúdo de umidade da planta, ou seja, a biomassa da planta influencia nos valores do índice. Desta forma, uma alternativa possível seria ponderar o NDWI em função do índice de área foliar. Já a TCW poderia ser aprimorada se estimando os coeficientes da transformação *Tasseled Cap* para a área de estudo (Jackson, 1983). Por fim, a adoção de um modelo de desagregação mais local, como a adoção de uma janela móvel na estimativa de mínimos quadrados, poderia possivelmente contribuir para diminuir ainda mais os erros de estimativa.

De qualquer forma, os resultados apresentados apontam para a possível utilização das superfícies de temperatura desagregadas em aplicações locais, tais como o monitoramento de evapotranspiração em áreas agrícolas e a inversão de modelos do sistema solo-planta-atmosfera.

Referências Bibliográficas

- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133(4), p.380-394, 2007.
- Barsi, J.A. LANDSAT TM and ETM+ thermal band calibration. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.29, p.141-153, 2003.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, 213(1-4), p. 198-212, 1998a.
- Chander, G.; Markham, B. Revised LANDSAT 5 TM radiometric calibration procedure and post-calibration dynamic ranges. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 22, p.256-263, 1984.
- Crist, E.P.; Cicone, R.C. A physically-based transformation of Thematic Mapper Data – the TM *Tasseled Cap*. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 41, p.2674-2677, 1983.
- Choudhury, B. J.; et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v.50, p.1-17, 1997.
- Gao.B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p.257-266, 1996.
- Gowda, P.H.; et al. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, v.26(3), p.223-237, 2008.

Jackson, R. Spectral Indices in n-space. **Remote Sensing of Environment**, v.13, p.409-421, 1983.

Kalman, J.D.; Mcvicar, T. R.; McCabe. M.F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v.29(4-5), p.421-469, 2008.

Kauth, R.; Thomas, G.S. The tasseled Cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. **LARS Symposia**, artigo 159, 1976.

Kustas, W.P.; et al. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. **Remote Sensing of Environment**, v.85, p.429-440, 2003.

Liu, D.; Pu, R. Downscaling Thermal Infrared Radiance for Subpixel Land Surface Temperature Retrieval. **Sensors**, v. 8, p.2695-2706, 2008.

Liu, Y.; et al. Reducing the discrepancy between ASTER and MODIS land surface temperature products. **Sensors**, v.7, p.3043-3057, 2007.

Markham, B. L; Barker, J. L. Landsat MSS and TM postcalibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at satellite temperatures.” **EOSAT Landsat Technical Notes**,1:3-8, 1986.

Mira, M.; et al. Influence of the soil moisture effect on the thermal infrared emissivity. **Journal of Geophysical Research**, v.112, 2007.

Moran, M.S. TIR as an indicator of plant ecosystem health. In: Quattrochi, D.A.; Luvall, J.C (Org.). **Thermal remote sensing in land surface processes**. Boca Raton: CRC Press, 1 ed., 2003, p.257-282.

Norman, J.M.; Kustas, W.P.; Humes, K.S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v.77, 263-293, 1995.