

ENSAIO COMPARATIVO SOBRE MÉTODOS DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL COM USO DOS SATÉLITES NOAA

ANÍBAL GUSSO¹
DENISE CYBIS FONTANA²

¹UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
CEPSRM-UFRGS Caixa Postal 1541-Porto Alegre-RS, Brasil
hanibal@if.ufrgs.br

²UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Faculdade de Agronomia-Porto Alegre-RS, Brasil
dfontana@vortex.ufrgs.br

Abstract. The surface temperature is net result of the climatic energy balance to the environmental process at the earth. A comparative study of three algorithms for the estimation of land surface temperature is developed. The methods to estimate land surface temperature measurements from the thermal infrared radiation, use data collect from Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) instruments.

Keywords: remote sensing, temperature, AVHRR.

1. Introdução

A *temperatura da superfície terrestre* (TST) freqüentemente têm sido tema de pesquisas em trabalhos científicos (Becker & Li 1990; Kerr et al., 1992; Prata 1994b; Ulivieri et al., 1994; Sobrino, Li & Becker, 1994) e tem sido bastante exigida para várias aplicações na meteorologia e estudos dos recursos naturais, principalmente na estruturação de modelos de balanço de energia, parâmetros biofísicos e bioclimáticos da superfície. Informações sobre a TST têm significativa relevância científica com contribuições importantes em um vasto campo das atividades econômicas e comerciais ligadas à agricultura.

Para o levantamento de temperaturas no Estado do Rio Grande do Sul estão disponíveis aproximadamente 40 estações meteorológicas de superfície atualmente em funcionamento, pertencentes à FEPAGRO (Fundação de Pesquisa Agropecuária do RS) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Em geral, relações entre variáveis climáticas regionais são generalizadas para áreas muito extensas e por isso, os modelos teóricos físicos construídos descrevem situações e condições muito específicas, impondo freqüentemente um caráter empírico aos resultados.

O sensor AVHRR “*Advanced Very High Resolution Radiometer*” a bordo do satélite NOAA “*National Oceanic and Atmospheric Administration*”, pode fornecer os dados com periodicidade adequada para estudos agrometeorológicos. Adicionalmente, vários estudos têm apontado o fator *emissividade* (ϵ) da superfície como a maior fonte de erro na estimativa da TST. Prabhakara et al. (1974), verificaram que erros decorrentes da emissividade estão mais concentrados em locais específicos do planeta.

O objetivo geral deste trabalho foi investigar a adequação do uso de sensores orbitais classe AVHRR/3 NOAA para monitoramento da temperatura da superfície terrestre (TST) no Estado do Rio Grande do Sul, pela comparação de três métodos amplamente utilizados pela comunidade científica internacional. Método de Griend and Owe (1993), método de Kerr et al (1992) e Split-Window de Becker and Li (1990), com emissividade constante.

3. Teoria

Os sensor AVHRR/3-NOAA é um radiômetro de rastreamento de 3ª geração que proporciona imagens em tempo real em múltiplos níveis de informação em 6 canais do espectro eletromagnético. Cada banda é sensível a uma faixa do espectro eletromagnético e estão localizadas desde a faixa do visível até o infravermelho termal.

Tabela 1. Características radiométricas do sensor AVHRR

Bandas (mm)	AVHRR/2	AVHRR/3
Canal	NOAA 12,14	NOAA 15,16
1	0,55 – 0,68	0,55 – 0,68
2	0,78 – 1,10	0,84 – 0,87
3A	-	1,58 – 1,64
3B	3,55 – 3,93	3,55 – 3,93
4	10,3 – 11,3	10,3 – 11,3
5	11,5 – 12,5	11,5 – 12,5

O modelo teórico para a estimativa de temperaturas por radiometria, fundamenta-se no princípio de que toda a matéria emite *Radiação Eletromagnética* (REM) e possui um espectro contínuo de emissão próprio e característico da sua temperatura e de suas propriedades. Segundo a teoria da radiação de corpo negro, publicada por Max Planck em 1900 e corroborada experimentalmente por Lummer & Pringshein (1899) e Coblenz (1916), qualquer objeto com temperatura acima do zero absoluto ($\approx -273^\circ \text{C}$), emite radiação cuja a intensidade é função apenas da temperatura que este se encontra. Portanto, decorre dessa base teórica, que no regime atual de rotação e irradiação solar, a Terra emite radiação em toda a faixa de 3,0 a 50,0 μm .

Equação 1.

$$P = e(\lambda) \cdot s \cdot T^4$$

onde T é a temperatura do objeto, (K); s é a constante de Stefan-Boltzmann ($6.67 \cdot 10^{-11} \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), P é a potência irradiada por unidade de área da superfície, (w/m^2);

A lei da radiação de Planck prevê que a potência irradiada por um corpo real é corrigida por um fator emissividade e . A quantidade chamada emissividade e , compara a habilidade dos materiais reais em emitirem energia como um corpo negro, analogamente a quantidade a , que expressa a habilidade dos corpos em absorverem energia em um determinado comprimento de onda. Ambos derivam da equação geral da lei de Kirchoff do equilíbrio térmico.

Neste estudo foram comparados três métodos de monitoramento e estimativa da TST, dois deles se utilizam do cálculo do índice de vegetação como representativo da emissividade. O método *Split-Window* (Becker & Li, 1990), ou janela dividida local, apresenta uma boa precisão da estimativa da TST, desde que as emissividades da superfície estudada em dois canais adjacentes sejam conhecidos com precisão suficiente. Além disso, ele minimiza os efeitos atmosféricos pela combinação de brilho dos canais 4 e 5 do sensor orbital AVHRR/NOAA. O termo local se refere aos coeficientes da equação, informando que o brilho da superfície em cada pixel não depende do estado da atmosfera, mas apenas da emissividade da área observada. Esse método tem se mostrado eficiente para a estimativa da *temperatura da superfície do mar* (TSM) e já é operacionalizado pelo NOAA/NEDSIS. Além

disso, o teste deste método com um valor de emissividade constante visa proporcionar um entendimento maior sobre os outros dois métodos em que a emissividade é uma variável como função do NDVI.

A idéia de melhorar a aplicação do método Split-Window, consiste em conhecer com precisão a emissividade na faixa do infravermelho termal ou pela incorporação de outras variáveis mais representativas da emissividade na superfície terrestre como *Índice de vegetação por Diferença Normalizada* (NDVI). O ganho de precisão com estas modificações é conhecido. Entretanto tais métodos se valem de modelos teóricos que necessitam do cruzamento de duas ou mais imagens (diurna e noturna) próximas temporalmente para correlação.

3. Material e Métodos

O estudo foi feito no Estado do Rio Grande do Sul localizado no extremo sul do Brasil, sendo delimitado pelas latitudes 27°04'49''S e 33°44'42''S e longitudes 49°42'22'' W e 57°38'34''W.

Em estudos que se utilizam do radiômetro AVHRR, com resolução espacial de 1.100m no nadir, a correção geométrica e georreferenciamento são procedimentos tão importantes quanto complexos para extração de resultados satisfatórios. Por isso, tais correções foram executadas em duas etapas. Na primeira, foi utilizado o modelo orbital de georreferenciamento e correção geométrica. Na segunda, aplicou-se um método mais rigoroso para georreferenciamento com um número aproximado de 55 pontos de controle distribuídos homogeneamente sobre o Estado, o que possibilitou fazer o erro médio permanecer em cerca de 1,01 *pixel*.

Para a transformação dos registros radiométricos de 10 bits, 1024 contadores digitais, em informação de temperatura foi utilizado um módulo especializado no *software* ERDAS versão 8.5. Este módulo possibilita uma transformação dos contadores digitais para radiancia e através da equação de Planck, obtém-se os dados de temperatura de brilho. Os métodos multi-bandas como *split-window* (Becker & Li, 1990), usam uma combinação linear das temperaturas de brilho das bandas 4 e 5.

A TST foi determinada, segundo o método dado pela equação 1:

$$TST = 1,274 + \left[1 + 0,15616 * \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) - 0,482 * \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \right] * \left[\frac{T_4 + T_5}{2} \right] + \left[6,26 + 3,98 * \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) + 38,33 * \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \right] * \left[\frac{T_4 - T_5}{2} \right]$$

Onde: $\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2$ é a emissividade média das bandas 4 e 5; T_4 e T_5 são as temperaturas de brilho medidas nas bandas 4 e 5, respectivamente, em (K); $\Delta \varepsilon$ é a variação de emissividade admitida entre as bandas 4 e 5.

O método de Kerr et al, apesar de não exigir a variável emissividade incorpora o efeito da emissividade como função do NDVI.

$$T_S = C * T_V + (1 - C) * T_5$$

$$\text{Onde: } C = (NDVI - NDVI_S) / (NDVI_V - NDVI_S)$$

$$T_V = -2.4 + 3.6 * T_4 - 2.6 * T_5$$

$$T_S = 3.1 + 3.1 * T_4 - 2.1 * T_5$$

Os índices S e V se referem as superfícies solo descoberto (S) e de áreas vegetadas(V), e as variáveis T_S e T_V são dadas por uma combinação linear das temperaturas de brilho das bandas 4 e 5, na forma de:

O método de Griend and Owe estima a emissividade em função do NDVI e este resultado é aplicado diretamente na equação do método Split-Window. Assim, dada uma imagem de NDVI:

$$\text{NDVI} \leq 0.24 \text{ é aplicado } e = 0.94$$

ou então, $\text{NDVI} > 0.24$ a emissividade é assumida como: $e = 1.0094 + 0.047 * \text{Ln}(\text{NDVI})$

Para verificar a acurácia das estimativas de TST obtidas pelos métodos propostos, foram coletados dados medidos na superfície para os mesmos dias e horários das imagens selecionadas. Os dados coletados na superfície se referem a temperatura do ar a 1,5m de altura, registrada nos termógrafos, em 8 estações meteorológicas de superfície localizadas em distintas regiões do Estado do Rio Grande do Sul, fornecidos pelo 8º Distrito de Meteorologia/INMET (Tabela 2). Foi utilizada uma janela de 9 pixels como representativa da temperatura média do local da estação meteorológica.

Foram utilizadas imagens diurnas e noturnas do satélite NOAA-14, 15 e 16, em condições meteorológicas específicas de ausência de nebulosidade, caracterizadas por um sistema anti-ciclônico sobre a região. As imagens diurnas foram usadas para gerar os dados de emissividade em função do NDVI e agrupadas em número de 5 para cada mês das imagens noturnas.

Tabela 1 – Datas das imagens NOAA diurnas e noturnas selecionadas.

No	Imagem	Ano	Dia	Hora local	AVHRR/NOAA
Imagens noturnas					
1	02176a16	2002	25/06	02:18	16
2	02195b15	2002	14/07	20:04	15
3	02196a16	2002	15/07	01:59	16
4	02196a14	2002	15/07	06:23	14
5	02196a15	2002	15/07	07:18	15
6	02223a16	2002	11/08	02:04	16
Imagens diurnas					
7	02155b16	2002	04/06	13:15	16
8	02165b16	2002	14/06	13:06	16
9	02173b16	2002	22/06	13:19	16
10	02175b16	2002	24/06	12:57	16
11	02176b16	2002	25/06	12:46	16
12	02194b16	2002	13/07	12:49	16
13	02195b16	2002	14/07	12:38	16
14	02196b16	2002	15/07	11:27	16
15	02204b16	2002	23/07	11:40	16
16	02209b16	2002	28/07	12:25	16
17	02221b16	2002	09/08	11:54	16
18	02230b16	2002	18/08	11:56	16
19	02237b16	2002	25/08	12:19	16
20	02238b16	2002	26/08	12:08	16
21	02239b16	2002	27/08	11:56	16

Tabelas 3 – Temperaturas da superfície (°C), na posição das estações para os 3 métodos.

Método de análise - Emissividade fixa (e = 0.98)						
Horário local de passagem do satélite						
<i>8° DISME</i>	25/06	14/07	15/07			11/08
Estação	02:18	20:04	01:59	06:23	07:18	02:04
Bajé	-0.764	8.304	6.594	4.336	3.880	7.705
Bom Jesus	-4.095	2.139	1.674	0.682	0.602	5.017
Caxias	-1.344	5.412	4.460	3.706	3.185	6.344
Encru. Sul	1.246	6.584	5.293	4.145	3.655	5.942
Lag. Vermelha	-2.067	4.946	3.078	1.483	0.972	5.266
Santa Vitória	0.916	7.468	5.482	4.803	3.692	7.469
São Luiz G.	1.730	7.251	7.114	5.120	4.298	7.469
Porto Alegre	2.263	8.652	6.868	5.973	5.233	8.887

Método de análise - Emissividade por NDVI (Kerr et al, 1992)						
Horário local de passagem do satélite						
<i>8° DISME</i>	25/06	14/07	15/07			11/08
Estação	02:18	20:04	01:59	06:23	07:18	02:04
Bajé	-0.627	9.415	7.629	5.360	5.035	9.932
Bom Jesus	-4.941	2.019	1.461	0.514	0.438	5.272
Caxias	1.450	7.416	6.412	5.571	5.190	8.629
Encru. Sul	0.346	5.652	4.341	3.159	2.794	5.372
Lag. Vermelha	-2.559	4.677	2.753	1.211	0.648	4.125
Santa Vitória	0.556	7.423	5.384	4.701	3.623	7.204
São Luiz G.	0.882	6.623	6.373	4.444	3.746	6.634
Porto Alegre	3.537	10.264	8.416	7.520	6.847	9.919

Método de análise - Emissividade por NDVI (Griend and Owe, 1993)						
Horário local de passagem do satélite						
<i>8° DISME</i>	25/06	14/07	15/07			11/08
Estação	02:18	20:04	01:59	06:23	07:18	02:04
Bajé	0.013	9.478	7.767	5.503	5.030	9.365
Bom Jesus	-3.662	2.755	2.295	1.297	1.217	5.854
Caxias	0.349	6.893	5.941	5.189	4.654	7.992
Encru. Sul	1.657	6.954	5.662	4.514	4.018	6.452
Lag. Vermelha	-1.513	5.517	3.648	2.046	1.538	5.554
Santa Vitória	1.520	8.146	6.158	5.478	4.362	8.272
São Luiz G.	2.134	7.687	7.554	5.554	4.726	7.869
Porto Alegre	3.248	9.698	7.912	7.014	6.267	9.904

Tabela 2 – Coordenadas geográficas das estações meteorológicas.

Posição da estação			Temperatura do ar (°C) registrada na hora local					
Estação	Coordenadas		25/06	14/07	15/07			11/08
	latitude	longitude	02:18	20:04	01:59	06:23	07:18	02:04
Bajé	-31° 20' 13''	-54° 06' 21''	1.6	13.0	11.2	10.0	7.0	10.6
Bom Jesus	-28° 40' 10	50° 26' 25''	-2.4	9.0	5.0	3.4	3.0	2.6
Caxias	-29° 10' 25	-51° 12' 21''	-1.6	9.6	8.8	7.2	7.0	10.0
Enc. do Sul	-30° 32' 35''	-52° 31' 20''	3.0	10.2	9.0	8.0	8.0	10.0
Lag. Vermelha	-28° 25' 35''	-51° 35' 51''	-0.4	12.2	8.6	7.0	7.6	8.6
Santa Vitória	-33° 31' 14''	-53° 21' 47''	4.2	17.0	10.6	10.2	10.2	12.0
São Luiz G.	-28° 23' 27''	-54° 58' 18''	2.2	15.6	12.6	10.0	9.6	12.0
Porto Alegre	-30° 01' 53''	-51° 13' 19''	6.0	12.8	8.0	7.6	7.4	9.0

Por fim, as temperaturas radiométricas T_s estimadas na superfície do solo através dos métodos propostos, para uma janela de 9 pixels centralizada sobre a coordenada das estações meteorológicas, foram comparadas às temperaturas do ar medidas nas mesmas T_A .

Resultados e discussão

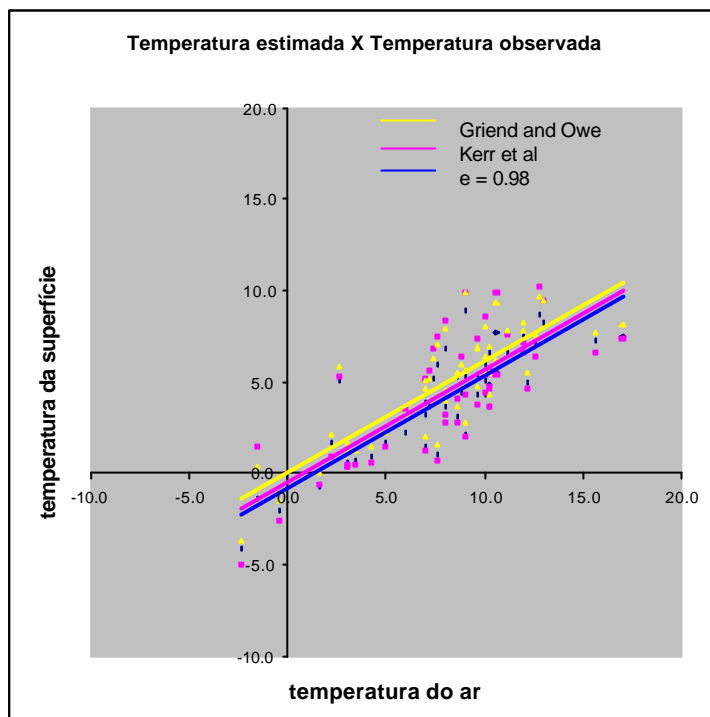
Na Tabela 4 e Figura 1 são apresentadas as relações entre a temperatura do ar medida a 1,5m de altura do solo para as oito estações meteorológicas e a temperatura da superfície estimada a partir do sensor AVHRR/NOAA. São apresentadas também as diferenças entre as medidas onde ΔT é a variação de temperatura, dado por:

$$\Delta T = T. \text{ da superfície} - T. \text{ do método}$$

Tabela 4 - Temperatura do ar medida a 1,5m em estação meteorológica e a temperatura da superfície estimada a partir do sensor AVHRR/NOAA.

Dados estatísticos				
Método	ΔT médio	ΔT máximo	ΔT mínimo	Desvio médio
e = 0.98	3.93	9.53	0.26	1.548835
Kerr et al	3.56	9.58	0.08	2.144429
Griend and Owe	3.05	8.85	0.066	1.745167

Figura 1 – Relação entre a temperatura do ar medida a 1,5m em estação meteorológica e a temperatura radiométrica estimada a partir do sensor AVHRR/NOAA.



Verifica-se que as temperaturas medidas nas estações meteorológicas tiveram forte tendência de serem superiores às temperaturas radiométricas. Este resultado é esperado, visto que a comparação feita envolve dois níveis diferenciados de medição, quais sejam: superfície do solo (temperatura radiométrica) e à 1,5m de altura (temperatura da estação). No Estado do Rio Grande do Sul, Oliveira (1997) analisando uma série de 1944 a 1993 de dados meteorológicos, obteve uma diferença entre a temperatura da relva (superfície) e a temperatura a 1,5m de altura de 3 °C em média.

Durante a noite, via de regra, as menores temperaturas ocorrem na superfície do solo, o qual se resfria pela perda de energia através da emissão de radiação infravermelha, e este resfriamento é que promove o resfriamento da camada de ar próximo à superfície, fazendo com que as camadas de ar sucessivas tenham temperaturas mais altas a medida que se afastam da superfície do solo. Deve-se considerar que, além da diferença dos níveis de medição, também a natureza das medições são diferentes, o que torna o resultado coerente.

Preliminarmente o método de Griend e Owe apresenta os melhores resultados, pois mantém a diferença média de temperatura muito próximo ao valor esperado conforme pode ser acompanhado na tabela 3.

Na estimativa da temperatura da superfície através do método *Split-Window* ($\epsilon=0,98$), observam-se as estimativas mais altas e uma diferença média maior que os outros dois métodos. Adicionalmente, o desvio médio padrão é o menor deles. Isto reforça a idéia de que se torna muito necessário um método sensível as variações da emissividade da superfície.

Os autores observaram uma recorrente anomalia entre as medidas comparadas com a estação de São Luiz Gonzaga (S 28° 23' 27" O 54° 58' 18"), que concentrou as maiores diferenças de temperatura nos três métodos, também já observado em outro estudo.

O método *Split-Window* proposto por Becker & Li (1990), mesmo que na sua estrutura mais simples (emissividade constante), tem se mostrado bastante eficiente na estimativa da TST. Este método é muito recomendado por ser capaz de reduzir os efeitos atmosféricos por incorporar regressões lineares da equação de transferência radiativa. Recomenda-se, entretanto, em trabalhos futuros testar outros métodos de estimativa da temperatura da superfície que também incorporem estimadoras da emissividade da superfície. Por fim, o autor salienta o caráter ensaístico deste estudo decorrentes do pioneirismo para a região e que no futuro estará testando outros procedimentos e métodos de análise.

Conclusões

Os dois métodos que utilizam *Split-Window* proposto por Becker & Li (1990) mas com emissividade dependente do NDVI se mostraram eficientes especialmente o método de Griend and Owe, na estimativa da superfície do solo em diversas regiões do Estado do Rio Grande do Sul.

Bibliografia citada

- Becker, F. Z.-L.Li. Towards a Local Split-Window Method Over Land Surfaces. *Int. J. Remote Sensing*, 11, N3, 369-393, (1990).
- Caselles, V., Valor, E. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to european, african and south american areas. *Remote Sens. Env.* 57:167-184, (1996).
- Griend A. A. Van de and M. Owe. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote sensing*, 14: 1119-1131, (1993).
- Kerr, H. Y., Lagourade, J. P. & Imbernom, J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 40, 1-20, (1992).
- Oliveira, H. T. Climatologia das temperaturas mínimas e probabilidade de ocorrência de geada no Estado do Rio Grande do Sul. *Dissertação de mestrado, UFRGS*, (1997).
- Prabhakara, C., Dalu, G., & Kunde, V. G. Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11µm to 13µm window region. *Journal of Geoscience Research*, 79 (12), 1744-1749, (1974).
- Prata, A. J. Land surface determination from satellites. *Advances in Space Research*, 14 (3), 315-326, (1994b).
- Sobrino, J. A, Li, Z. L., Stoll, M. P, & Becker, F. Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 32 (2), 243-253, (1994).
- Ulivieri, C., Castronuovo, M. M, Francioni, R., & Cardilo, A. A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Advances in space Research*, 14 (3), 59-65. (1994).