

Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com uso do sensor AVHRR/NOAA

Aníbal Gusso⁽¹⁾, Denise Cybis Fontana⁽¹⁾ e Glauber Acunha Gonçalves⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Caixa Postal 15044, CEP 91501-970 Porto Alegre, RS. E-mail: anibal.gusso@ufrgs.br, dfontana@ufrgs.br ⁽²⁾Fundação Universidade do Rio Grande, Dep. de Física, Laboratório de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 475, CEP 96201-900 Rio Grande, RS. E-mail: glauberac@ufpr.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação do uso do sensor AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration) para mapeamento da temperatura da superfície terrestre (TST) no Estado do Rio Grande do Sul, por meio da comparação entre três algoritmos clássicos. Foram comparados os métodos de Becker & Li, Sobrino et al. e Kerr et al. para estimativa das TST mínimas, utilizando imagens noturnas e logo após o amanhecer. Os dados de emissividade e TST foram obtidos por meio de combinações matemáticas da radiação detectada nas faixas do visível, infravermelho próximo e termal do sensor AVHRR/NOAA. O sensor AVHRR é adequado para o mapeamento de TST para as condições do tipo de cobertura do solo que predominam no Rio Grande do Sul, visto que a TST estimada pelos três métodos testados foi próxima à temperatura do ar medida nos locais selecionados. O método de Sobrino et al. foi o mais adequado.

Termos para indexação: sensoriamento remoto, janela dividida, temperatura do ar, infravermelho, termal.

Mapping land surface temperature using AVHRR/NOAA sensor

Abstract – The objective of this work was to evaluate the suitable use of AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration) on land surface temperature (LST) mapping in Rio Grande do Sul State by means of the comparison of three classic algorithms. The methods of Becker & Li, Sobrino et al. and Kerr et al. were compared for the minimum LST estimation, using nocturnal and predawn images. Both emissivity and LST data were obtained by means of mathematical combinations of the visible, near-infrared and thermal detected radiation of the AVHRR/NOAA sensor. The AVHRR sensor is suitable for LST mapping for the overall conditions of soil coverage in Rio Grande do Sul, once the estimated LST, by the three tested methods, was close to the measured air temperature at the selected locations. Sobrino et al. was the most adequate method.

Index terms: remote sensing, split-window, air temperature, infrared, thermal.

Introdução

Técnicas radiométricas de baixo custo e a utilização dos sensores orbitais na estimativa da temperatura da superfície terrestre (TST), no Estado do Rio Grande do Sul, podem auxiliar no monitoramento agrícola e na estimativa de parâmetros meteorológicos, e dessa forma, disponibilizar mais detalhamento da distribuição espacial e temporal da TST.

Por meio dessas técnicas, a TST é determinada a partir da detecção da radiação de ondas longas, emitida na faixa do infravermelho, e detectada por sensores orbitais, como o AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer), instalado a bordo dos satélites

da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), classe POES (Polar Operational Environmental Satellite). O sensor AVHRR é um radiômetro de rastreamento que proporciona imagens, em múltiplos níveis de informação, com cinco bandas no espectro eletromagnético distribuídas desde o visível até o infravermelho termal (Kidwell, 1995).

Os modelos de estimativa da TST por radiometria fundamentam-se no princípio de que todo o corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação eletromagnética. Segundo Hecht (1998), a base teórica, portanto, é a lei da radiação de Planck publicada em 1900, a qual descreve como a energia irradiada de um corpo negro, prevista na lei de

Stefan-Boltzmann, está distribuída em termos de comprimentos de onda no espectro eletromagnético.

De acordo com a lei do deslocamento de Wien de 1893, que relaciona o comprimento de onda com o máximo de emissão, os corpos sobre a superfície terrestre, em temperatura ambiente próxima a 300 K, emitem radiação em toda a faixa de comprimentos de onda que vai de 3 a 80 μm (Rosenberg, 1974), e têm o máximo de emissão em 9,7 μm (Lillesand & Kiefer, 1987).

Os trabalhos de McClain et al. (1985), Becker & Li (1990), Kerr et al. (1992), Sobrino et al. (1993), França & Cracknell (1994), Prata (1994), Wan & Dozier (1996), Caselles et al. (1997) e Coll & Caselles (1997) freqüentemente são citados como os principais métodos usados na estimativa da TST com base nos dados dos canais termais do sensor AVHRR. Adicionalmente, outros trabalhos como os de Kerdiles et al. (1996), Andersen (1997), Qin & Karnieli (1999), Sobrino et al. (2001), Chrysoulakis & Cartalis (2002) e Ouaidrari et al. (2002) indicam que as maiores dificuldades na estimativa da TST, por meio de sensores orbitais, estão relacionadas com perturbações introduzidas durante a transferência da energia irradiada através da atmosfera; e com características emissivas diferentes das de um corpo negro da superfície observada.

Na região do infravermelho termal (de 8 a 14 μm) do espectro eletromagnético, está situada uma janela atmosférica que é definida como a região onde ocorrem as menores interações da atmosfera com a radiação emitida ou refletida pela superfície da Terra. Sensores posicionados de maneira a detectar a radiação, nesta região do espectro eletromagnético, têm sido amplamente utilizados para determinação da TST. Entretanto, é necessário salientar que, mesmo nessas janelas, a atmosfera não apresenta nível de transparência suficiente para ser desconsiderada (Kerr et al., 1992). Os processos de atenuação da radiação eletromagnética nas regiões termais das janelas atmosféricas são devidos, principalmente, à presença de vapor de água (Becker & Li, 1990). O uso de uma combinação de dois canais termais adjacentes para corrigir efeitos atmosféricos é conhecido como método "split-window" ou ainda janela dividida local. O termo local se refere ao parâmetro emissividade que deve ser corrigido para as condições locais pela influência que exerce na estimativa da TST.

Com relação às características emissivas, como, no ambiente, não é possível encontrar corpos negros ideais, tais como os descritos pela teoria de corpo negro, a outra possibilidade é admitir-se uma correção para

corpos reais. A emissividade $\epsilon(\lambda)$ é o parâmetro de correção e o fator λ indica a dependência com o comprimento de onda. Este parâmetro compara, portanto, a habilidade dos materiais reais de emitirem energia como um corpo negro, em cada comprimento de onda (Bramson, 1968), apresentando valores compreendidos entre $0 < \epsilon(\lambda) < 1$. Fisicamente, a emissividade está relacionada a uma capacidade, inerente à superfície, em converter energia armazenada em energia radiante, emitindo-a para o espaço (Sobrino et al., 2001). Diferentemente dos oceanos, os valores de emissividade da superfície terrestre geralmente variam de 0,9 até próximo de 1,0 e dependem da rugosidade, do tipo de solo e da cobertura presente, além de outros parâmetros físicos (Andersen, 1997), mas principalmente da distribuição da vegetação (Salisbury & D'Aria, 1992).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação do uso do sensor AVHRR/NOAA para mapeamento da temperatura da superfície terrestre (TST) no Estado do Rio Grande do Sul, por meio da comparação entre três algoritmos clássicos.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em área que abrange o Estado do Rio Grande do Sul, com 281.731,64 km^2 , localizada no extremo Sul do Brasil. Esta região é dominada pelo clima subtropical e temperado, respectivamente, caracterizados como Cfa e Cfb, segundo Köppen (1948). O tipo de cobertura predominante, no sul do Estado, são campos naturais e uma pequena área ocupada por lavouras de arroz, especialmente próximo ao litoral. Já no norte do Estado, a predominância é de áreas agrícolas de soja e milho, no verão, e trigo, no inverno, com campos e florestas em menor proporção.

Foram utilizadas imagens do sensor AVHRR a bordo dos satélites NOAA-15 e NOAA-16, captadas na estação de recepção HRPT (High Resolution Picture Transmission) de imagens dos satélites NOAA no Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS).

Foram selecionadas 11 imagens de horários noturnos ou logo após o amanhecer (Tabela 1), no ano de 2002, relativas a noites com baixas temperaturas e ausência de nebulosidade, condições meteorológicas características de um sistema anticiclônico, sobre a região. Considerando datas próximas das imagens noturnas, foram selecionadas 20 imagens diurnas (Tabela 2), também

com baixa nebulosidade sobre o Estado, destinadas à composição de imagens de máximo NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de períodos de cinco dias. As imagens diurnas foram utilizadas como estimadores da emissividade da superfície, usando a seguinte equação, segundo o modelo proposto por Valor & Caselles (1996):

$$\varepsilon = [0,985P_v + 0,96(1 - P_v) + 0,06P_v(1 - P_v)], \text{ sendo: } P_v = \left\{ \frac{[(1 - i/ig)]}{[(1 - i/ig) - k(1 - i/iv)]} \right\}, e$$

$$k = \frac{(\rho_{2v} - \rho_{1v})}{(\rho_{2g} - \rho_{1g})},$$

em que: i é o NDVI; ig é o NDVI solo nu; iv é o NDVI da superfície vegetada; ρ_1 e ρ_2 são a refletância nas bandas 1 e 2 do sensor AVHRR, sendo o índice v para vegetação e g para solo descoberto. Este modelo é derivado de uma relação física simples que pode ser adaptada para qualquer região espectral por escolha dos parâmetros adequados de cobertura do solo.

A correção geométrica e o georreferenciamento das imagens foram executados em duas etapas. Na primeira, foi utilizado o modelo da dinâmica orbital, ao passo que na

segunda, foi utilizado um modelo estocástico baseado em pontos de controle coletados na cartografia sistemática da região, com 60 pontos de controle distribuídos no Estado. Buscou-se um erro médio menor que 1,0 pixel (Gusso, 2003).

Na transformação dos registros radiométricos de 10 bits, 1.024 contadores digitais, em informação de temperatura, foi utilizado um módulo especializado no programa ERDAS (Leica Geosystems, 2003). Este módulo transforma os contadores digitais em radiância, utilizando parâmetros de calibração descritos em Kidwell (1995), e por meio da integração numérica da equação inversa de Planck $\{M(\lambda, T) = [(2hc^2/\lambda^5)]/[e^{hc/\lambda kT} - 1]\}$, em que $M(\lambda, T)$ é a potência irradiada por unidade de área em um dado comprimento de onda, que parte da superfície do corpo negro ($W m^{-2}$); λ é o comprimento de onda (m); T é a temperatura do objeto (K); h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} J s^{-1}$); c é a velocidade da luz ($2,997 \times 10^8 m s^{-1}$); k é a constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23} J K^{-1}$) obtém-se os dados de temperatura de brilho das bandas 3, 4 e 5. Foi aplicado o algoritmo proposto por Chen et al. (2002), para a detecção de nuvens e nevoeiros. Após interações, e havendo convergência, foi selecionado um limiar de pelo menos $13^\circ C$ para a diferença entre as temperaturas da banda 3 e 4 ($T_3 - T_4 > 13^\circ C$). Diferenças maiores que o limiar estabelecido regionalmente (Chen et al., 2002) são indicadoras da presença de nuvens e nevoeiros.

Nos horários de passagem dos satélites (Tabela 1), foram coletados dados na superfície de temperatura do ar, medida a 1,5 m de altura, registrados em termógrafos (Tar), fornecidos pelo 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet e Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – Fepagro (Tabela 3).

Tabela 1. Data e horário local das imagens noturnas ou logo após o amanhecer do sensor AVHRR/NOAA selecionadas.

Data	Horário	AVHRR/NOAA
24/5/2002	7h28min	15
25/6/2002	2h18min	16
14/7/2002	20h04min	15
15/7/2002	1h59min	16
15/7/2002	7h18min	15
11/8/2002	2h04min	16
27/8/2002	1h28min	16
3/9/2002	2h52min	16
4/9/2002	2h41min	16
4/9/2002	7h31min	15
25/9/2002	2h10min	16

Tabela 2. Data e horário local das imagens diurnas do sensor AVHRR/NOAA selecionadas.

Data	Horário	AVHRR/NOAA
4/6/2002	15h02min	16
14/6/2002	14h52min	16
22/6/2002	15h05min	16
24/6/2002	14h43min	16
25/6/2002	14h32min	16
13/7/2002	14h35min	16
14/7/2002	14h24min	16
15/7/2002	14h13min	16
23/7/2002	14h26min	16
28/7/2002	15h12min	16
9/8/2002	14h40min	16
18/8/2002	14h42min	16
25/8/2002	15h05min	16
26/8/2002	14h54min	16
27/8/2002	14h43min	16
2/9/2002	15h18min	16
4/9/2002	14h55min	16
14/9/2002	14h46min	16
24/9/2002	14h36min	16
25/9/2002	14h25min	16

Tabela 3. Coordenadas geográficas das estações meteorológicas, municípios e instituições.

Município	Instituição ⁽¹⁾	Altitude (m)	Latitude (S)	Longitude (W)
Bagé	8º Disme	212	31°00' 13"	54°06' 21"
Bom Jesus	8º Disme	1.046	28°40' 10"	50°26' 25"
Caxias do Sul	8º Disme	817	29°10' 25"	51°12' 21"
Encruzilhada do Sul	8º Disme	432	30°32' 35"	52°31' 20"
Farroupilha	Fepagro	783	29°14' 30"	51°26' 20"
Iraí	8º Disme	776	27°11' 00"	53°14' 00"
Lagoa Vermelha	8º Disme	801	28°25' 35"	51°35' 51"
Porto Alegre	8º Disme	3	30°05' 00"	51°10' 00"
Quaraí	Fepagro	112	30°23' 17"	56°26' 53"
Santa Rosa	Fepagro	277	27°51' 50"	54°25' 59"
Santa Vit. Palmar	8º Disme	23	33°31' 14"	53°21' 47"
São Luiz Gonzaga	8º Disme	231	28°23' 27"	54°58' 18"
Taquarí	Fepagro	54	29°48' 15"	51°49' 30"

⁽¹⁾Disme: Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia; Fepagro: Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária.

O método “split-window” proposto em Becker & Li (1990), provavelmente, é o mais citado em estudos que envolvem a estimativa da TST. Imagens do satélite NOAA-9 foram utilizadas em várias linearizações e simulações numéricas, usando seis modelos atmosféricos e dados de concentração de vapor de água, obtidos por radiossondagem sobre a equação de transferência radiativa. Foram, entretanto, considerados ângulos zenitais (z) de imageamento menores do que 50° e um total de vapor de água presente na atmosfera menor do que 3 g cm^{-2} . Os modelos atmosféricos aplicados foram: “Midlatitude Summer” (MLS), 1962 “Standard USA” (US), “Midlatitude Winter” (MLW) e “Subartic Summer” (SAS). Neste método, T_s é dado pelas equações: $T_s = \{1,274 + P[(T_4 + T_5)/2] + M[(T_4 - T_5)/2]\}$, sendo: $P = \{1 + 0,15616[(1 - \epsilon)/\epsilon] - 0,482[\Delta\epsilon/\epsilon^2]\}$, e $M = \{6,26 + 3,98[(1 - \epsilon)/\epsilon] + 38,33[\Delta\epsilon/\epsilon^2]\}$, em que P e M são parâmetros de ajuste; ϵ é a emissividade média das bandas 4 e 5 $[(\epsilon_4 + \epsilon_5)/2]$; $\Delta\epsilon$ é a variação da emissividade nas bandas 4 e 5.

Sobrino et al. (1993) propuseram algoritmos diferentes, dependentes da emissividade, considerando as situações atmosféricas. Foram considerados quatro modelos atmosféricos padrão: “Tropical” (T), “Midlatitude Summer” (MLS), 1976 “Standard USA” (US) e “Midlatitude Winter” (MLW), cujas concentrações de vapor de água variam entre $0,69$ e $3,32 \text{ g cm}^{-2}$. A temperatura é dada pela equação: $T_s = T_4 + [0,53 + 0,62(T_4 - T_5)](T_4 - T_5) + 64(1 - \epsilon)$, em que ϵ é a emissividade média das bandas 4 e 5 $[(\epsilon_4 + \epsilon_5)/2]$.

Kerr et al. (1992) propuseram um algoritmo semi-empírico para a estimativa da TST em ambientes áridos, com vegetação, e semi-áridos, com vegetação esparsa. Esse método, apesar de não exigir dados da emissividade da superfície conforme os métodos anteriores, incorpora o efeito da emissividade em função do NDVI no cálculo do coeficiente C . A equação proposta é: $T_s = CT_v + (1 - C)T_g$, em que $C = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_g)/(\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_g)$, sendo que T_v é dado por: $T_v = -2,4 + 3,6T_4 - 2,6T_5$ e T_g dado por: $T_g = 3,1 + 3,1T_4 - 2,1T_5$, em que os subíndices v e g representam a superfície com vegetação e do solo descoberto, respectivamente.

A partir dos dados extraídos sobre as estações meteorológicas, e utilizando dados de TST de uma janela de nove (3x3) pixels como representativa da temperatura média do local da estação meteorológica, foram ajustadas funções entre a T_{ar} e a TST para todos métodos, locais e datas. Foram determinados também, os valores médios, máximos, mínimos e o desvio-padrão das diferenças entre esses dois elementos.

Com base nessas análises, e considerando o critério de menor desvio-padrão, maior coeficiente de determinação, menores diferenças médias, máximas e mínimas entre T_{ar} e TST e desenvolvimento teórico de cada método, foi definido um algoritmo com melhor desempenho. Neste trabalho a T_{ar} foi usada somente como referência para as estimativas de TST, dada a natureza distinta entre T_{ar} e TST. Entretanto, o conhecimento sobre as relações que possam ser estabelecidas entre T_{ar} e TST, conceitualmente ou por meio de parametrizações, tem muitas aplicações na agrometeorologia. Foram, então, determinadas as diferenças entre a TST calculada pelo método de melhor desempenho com relação aos demais métodos testados, sendo apresentadas na forma de imagens diferença.

Resultados e Discussão

A TST estimada pelos métodos “split-window” avaliados apresentou associação com a temperatura do ar (T_{ar}), com coeficientes de determinação entre 0,73, para o método de Becker & Li (1990), e 0,77, para o método de Sobrino et al. (1993) (Figura 1).

Os coeficientes de determinação obtidos estão próximos aos referenciados na literatura. Kerdiles et al. (1996), monitorando uma área de 500.000 km^2 no pampa argentino, encontraram uma correlação de 0,81 e 0,9.

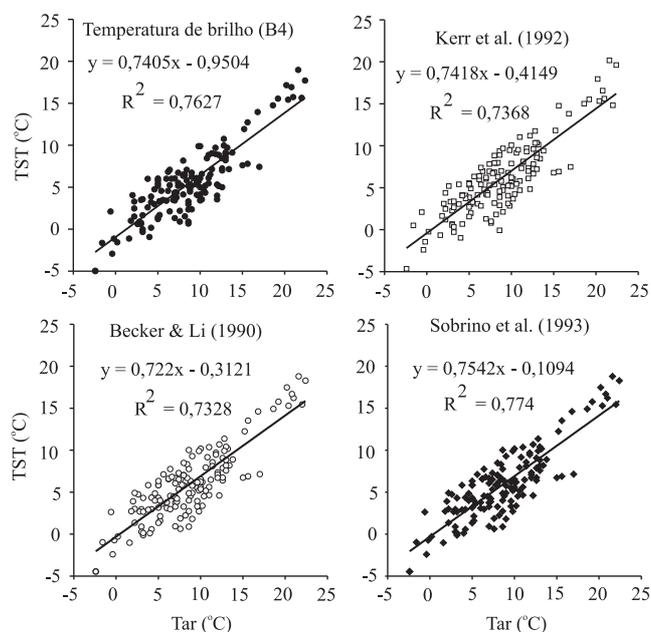


Figura 1. Relação entre temperatura do ar (T_{ar}) e temperatura da superfície terrestre (TST) estimada a partir dos métodos “split-window” para o Estado do Rio Grande do Sul.

Os resultados mostram que a diferença entre Tar e TST (Tar - TST) foi, na média de todos os métodos, de 2,99°C (Tabela 4). O método que apresentou a máxima diferença (9,86°C) foi o de Becker & Li (1990) e a mínima diferença média (2,54°C) ocorreu no método de Sobrino et al. (1993). Estes resultados são importantes, visto que Oliveira (1997) verificou, em diferentes regiões do Rio Grande do Sul, uma diferença média de cerca de 3°C entre a temperatura do ar medida na relva e a medida em abrigo meteorológico. Essa diferença decorre do tempo necessário para o transporte de energia, considerando uma diferença de 1,5 m entre a superfície e o abrigo meteorológico. Caselles et al. (1997) compararam métodos de estimativa da TST e encontraram para o método de Kerr et al. (1992) uma diferença média entre a Tar e a TST de 4,0°C e desvio-padrão de 1,1°C. No método de Becker & Li (1990), a diferença encontrada foi de 1,9°C, com desvio-padrão de 1,2°C.

Uma consideração importante na análise das diferenças do gradiente vertical de temperatura na Tar, a partir da superfície, é a caracterização da condição de estabilidade atmosférica. Neste trabalho, em virtude da ausência de medições de radiossondagem, admitiu-se a predominância de atmosfera estável nos horários de análise. Isto porque as imagens utilizadas abrangeram o período de outono e inverno e foram registradas durante a noite e com ausência de nebulosidade.

A temperatura de brilho (B4) não é um método de estimativa da TST, mas apenas uma referência, tendo em vista que a temperatura de brilho da banda 4 é a temperatura equivalente de um corpo negro referente ao comprimento de onda centrado na banda 4. Já a Tar é uma consequência do gradiente vertical de temperatura a partir da superfície. Apesar disso, a correção de emissividade tem a propriedade de ajustar a temperatura de brilho à TST.

A necessidade da combinação de duas ou mais imagens, nos métodos multiespectrais, assim como as

dificuldades decorrentes de grandes variações espaciais, nas características de cada tipo de solo e da atmosfera, tornam a estimativa da emissividade bastante complexa. Embora os métodos atuais ainda sejam muito sensíveis à contaminação pela radiação emitida do solo, autores como Andersen (1997), Gupta et al. (1997), Kerényi & Putsay (2000) e Sobrino et al. (2001) têm confirmado a eficiência do cálculo da emissividade utilizando o NDVI. Apesar disso, é conhecido, que a instabilidade temporal do fator emissividade também pode limitar a precisão dos métodos.

Resultados como diferenças médias (Tabela 4) menores e coeficiente de determinação (Figura 1) maior em comparação aos outros métodos testados sugerem o método de Sobrino et al. (1993) como fonte dos resultados mais consistentes. Com base nesse resultado, foram analisadas as imagens diferença entre os métodos, considerado o método de Sobrino et al. (1993) como a referência.

Nas amostras consideradas, a TST foi, em média, 2,99°C maior que a Tar. É importante salientar que a diferença média de 2,54°C por local, associada ao desvio-padrão de 1,79°C (em 68% das estimativas), é um resultado significativo, se for considerado o fato de que é esperada, segundo Oliveira (1997), a diferença média de 3°C entre Tar e TST conforme mencionado. Em muitos algoritmos, incluindo os aplicados neste trabalho, os valores de vapor de água considerados geralmente estão abaixo de 4 g cm⁻².

Becker & Li (1990) iniciaram acatando seis modelos atmosféricos, incluindo o modelo "Tropical" (T), que considera o maior índice de umidade (3,32 g cm⁻²), também levado em conta por Sobrino et al. (1993). Entretanto, nos cálculos finais, que levam ao algoritmo "split-window", os modelos "Tropical" (T) e "Subartic Winter" (SAW) são descartados, fazendo com que o máximo de vapor d'água na atmosfera permaneça ao redor de 2,6 g cm⁻². Assim, é possível que os melhores resultados obtidos neste trabalho com o modelo de Sobrino et al. (1993) estejam relacionados à inclusão do modelo atmosférico "Tropical" no algoritmo "split-window". Segundo Caselles et al. (1997), um cuidado especial deve ser dado à elaboração de modelos de atenuação da atmosfera que se destinam à estimativa da TST nas áreas localizadas fora da faixa intertropical.

Uma análise de dados de 1980 a 1995, feita por Ouaidrari et al. (2002), revelou que em muitas regiões do planeta é freqüente a ocorrência de valores acima de 7 g cm⁻², com a média variando entre 0,3 e 5,5 g cm⁻². Com base nessas

Tabela 4. Estatísticas da diferença entre a temperatura do ar (Tar, °C) e a temperatura estimada pelos métodos split window (TST, °C), e temperatura de brilho da Banda 4 (B4, °C) para o Estado do Rio Grande do Sul.

Parâmetro	Método			B4
	Kerr et al. (1992)	Becker & Li (1990)	Sobrino et al. (1993)	
Média	2,94	3,08	2,54	3,39
Mínimo	-2,68	-3,23	-3,39	-2,70
Máximo	9,52	9,86	8,89	9,58
Desvio-padrão	2,21	2,12	1,79	2,15

informações, depreende-se que dados regionais do total de vapor de água, presente na atmosfera sobre o Brasil, devem ser seriamente considerados em estudos futuros.

Na Figura 2, é apresentado um exemplo da diferença entre as estimativas de TST pelo método de Sobrino et al. (1993), em relação ao método de Becker & Li (1990) e Kerr et al. (1992), para o dia 11 de agosto, cujos comportamentos foram contrastantes. Na escala utilizada em níveis de cinza, os valores são mais negativos à

medida que vão para o cinza escuro e as diferenças positivas estão distribuídas para o cinza claro. Dessa maneira, as diferenças próximas de zero são apresentadas em tonalidades intermediárias de cinza. Observa-se que, de maneira geral, houve equivalência na distribuição espacial das diferenças de TST entre os métodos analisados pelos valores das médias e desvio-padrão semelhantes. Isto indica que os métodos de Becker & Li (1990) e Kerr et al. (1992), apesar das diferenças na forma da inserção do NDVI para obter a emissividade, tendem a apresentar resultados semelhantes nas estimativas de TST.

As diferenças entre as TST estimadas pelos métodos variaram mais significativamente dentro do intervalo de $-1,5^{\circ}\text{C}$ a $1,5^{\circ}\text{C}$. À semelhança do observado na Figura 2 B, na maioria das datas analisadas, predominaram os tons que tendem para cinza escuro, ou seja, em geral o método de Sobrino et al. (1993) estimou valores de TST maiores do que o método de Becker & Li (1990) e de Kerr et al. (1992).

Além disso, nas imagens apresentadas, fica evidente a existência de relação entre as estimativas de TST e a orografia. Em geral, as diferenças entre os métodos foram negativas em regiões próximas de corpos de água, como na região litorânea e perto de rios e açudes. Nas demais regiões, as diferenças foram positivas.

Conclusões

1. O sensor orbital AVHRR/3 NOAA classe POES é adequado para o mapeamento de temperaturas da superfície terrestre (TST), uma vez que a TST, estimada pelos três métodos testados, apresenta resultados próximos da temperatura do ar (Tar) medida nos locais selecionados.

2. Entre os métodos avaliados, o método de Sobrino et al. é o mais adequado para a estimativa das TST nas condições de cobertura do solo que predominam no Estado do Rio Grande do Sul.

Referências

- ANDERSEN, H.S. Land surface temperature estimation based on NOAA-AVHRR data during the HAPEX-Sahel experiment. *Journal of Hydrology*, v.189, p.788-814, 1997.
- BECKER, F.; LI, Z.-L. Towards a local split-window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, v.11, p.369-393, 1990.
- BRAMSON, M.A. *Infrared radiation: a handbook for applications*. New York: Plenum Press, 1968. 623p.

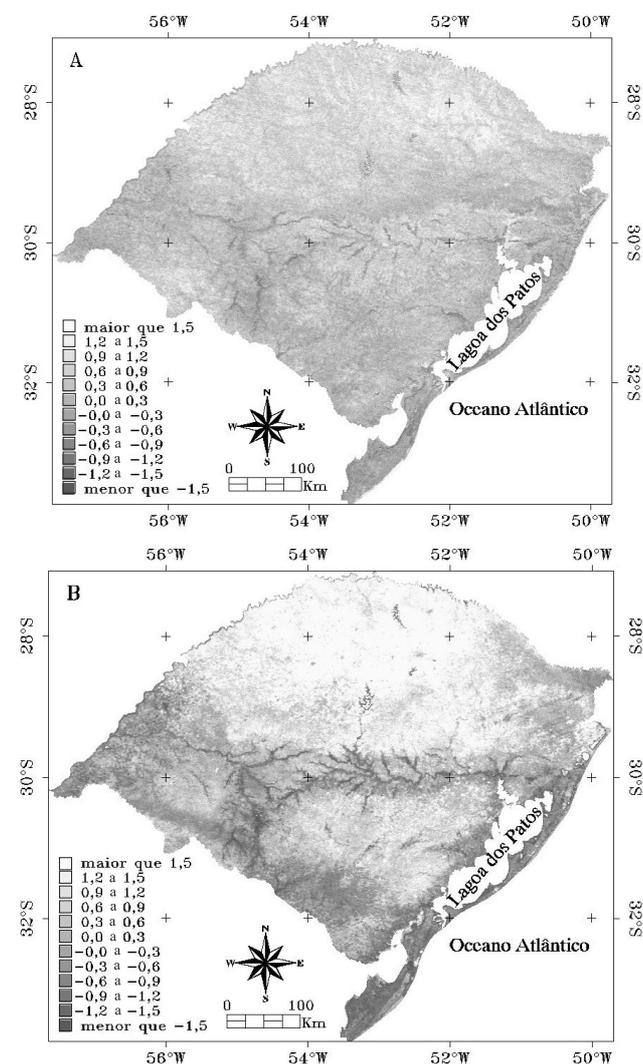


Figura 2. Imagens da diferença entre a temperatura da superfície terrestre estimada por Sobrino et al. (1993) e (A): Becker & Li (1990) e (B): Kerr et al. (1992), para o dia 11/8/2002. As diferenças de temperatura, distribuídas em níveis de cinza, estão concentradas entre $-1,5^{\circ}\text{C}$ (mais escuro) a $1,5^{\circ}\text{C}$ (mais claro).

- CASELLES, V.; COLL, C.; VALOR, E. Land surface emissivity and temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.1009-1027, 1997.
- CHEN, P.Y.; SRINIVASAN, R.; FEDOSEJEVS, G.; NARASIMHAN, B. An automated cloud detection method for daily NOAA-14 AVHRR data for Texas, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, p.2939-2950, 2002.
- CHRYSOULAKIS, N.; CARTALIS, C. Improving the estimation of land surface temperature for the region of Greece: adjustment of a split window algorithm to account for the distribution of precipitable water. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, p.871-880, 2002.
- COLL, C.; CASELLES, V. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: validation and algorithm comparison. **Journal of Geophysical Research**, v.102, p.16697-16714, 1997.
- FRANÇA, G.B.; CRACKNELL, A.P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in the north-eastern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, p.1695-1712, 1994.
- GUPTA, R.K.; PRASAD, S.; SESA-SAI, M.V.R.; VISWANADHAM, T.S. The estimation of surface temperature over an agricultural area in the state of Haryana and Panjab, India, and its relationship with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.3729-3741, 1997.
- GUSSO, A. **Monitoramento de temperaturas da superfície terrestre noturna no Estado do Rio Grande do Sul com uso do sensor orbital AVHRR/NOAA**. 2003. 68p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- HECHT, E. **Optics**. 3rd ed. Reading: Addison-Wesley, 1998. 694p.
- KERDILES, H.; GRONDONA, M.; RODRIGUEZ, R.; SEGUIN, B. Frost mapping using NOAA AVHRR data in the Pampean region, Argentina. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.79, p.157-182, 1996.
- KERÉNYI, J.; PUTSAY, M. Investigation of land surface temperature algorithms using NOAA AVHRR images. **Advances in Space Research**, v.26, p.1077-1080, 2000.
- KERR, Y.H.; LAGOUARDE, J.P.; IMBERNOM, J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v.41, p.197-209, 1992.
- KIDWELL, K.B. **NOAA polar orbiter data users guide**. Washington: US Department of Commerce, 1995. 255p.
- KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 466p.
- LEICA GEOSYSTEMS. **ERDAS IMAGINE**. Version 8.5. Heerbrugg, 2003. Available at: <http://gi.leica-geosystems.com>. Accessed on: 16 nov. 2006.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 2nd ed. New York: Wiley, 1987. 721p.
- McCLAIN, E.P.; PICHEL, W.G.; WALTON, C.C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea-surface temperatures. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.90, p.1587-1601, 1985.
- OLIVEIRA, H.T. **Climatologia das temperaturas mínimas e probabilidade de ocorrência de geada no Estado do Rio Grande do Sul**. 1997. 81p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- OUAIDRARI, H.; GOWARD, S.N.; CZAJKOWSKI, K.P.; SOBRINO, J.A.; VERMOTE, E. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: an assessment for the AVHRR land pathfinder II data set. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.114-128, 2002.
- PRATA, A.J. Land surface determination from satellites. **Advances in Space Research**, v.14, p.15-26, 1994.
- QIN, Z.; KARNIELI, A. Progress in remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, p.2367-2393, 1999.
- ROSENBERG, N.J. **Microclimate**: the biological environment. New York: Wiley, 1974. 315p.
- SALISBURY, W.; D'ARIA, D.M. Emissivity of terrestrial material in the 8-14 μ m atmospheric window. **Remote Sensing of Environment**, v.42, p.83-106, 1992.
- SOBRINO, J.A.; CASELLES, V.; COLL, C. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature. **Il Nuovo Cimento C**, v.16, p.219-236, 1993.
- SOBRINO, J.A.; RAISSOUNI, N.; LI, Z.-L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. **Remote Sensing of Environment**, v.75, p.256-266, 2001.
- VALOR, E.; CASELLES, V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to european, african and south american areas. **Remote Sensing of Environment**, v.57, p.167-184, 1996.
- WAN, Z.; DOZIER, J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.34, p.892-905, 1996.

Recebido em 29 de maio de 2006 e aprovado em 6 de novembro de 2006