

**Análise Comparativa dos Métodos de Calibração Linear
e Não-Linear para uma Imagem AVHRR/NOAA**

**ANALBERY MONTEIRO¹
ANDRÉ LUIZ BELÉM²
CARLOS ALBERTO EIRAS GARCIA²**

¹UFRGS - Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento
Remoto e Meteorologia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 15044
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil
DFSBERY@BRFURG

²URG - Departamento de Física
Universidade do Rio Grande
Caixa Postal 474
96201-900 Rio Grande, RS, Brasil
DFSGAR@BRFURG

Abstract. The calibration procedures for the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) infrared channels is examined in this work. The AVHRR literature states that the linear calibration used to convert radiometric count to radiance is satisfactory for channel 3, but is only approximately correct for channels 4 and 5 because they have a slight curvature in their response functions. So the nonlinearity correction is applied to verify the difference in temperature between the data calibrated only linearly and with nonlinearity correction. The standard National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS) linear calibration is used and the nonlinear corrections are made over the radiance as suggested by Steyn-Ross et al. (1992). Sea Surface Temperatures (SST) are calculated using published split-window algorithms revised by Pearce et al. (1989) and that given by NESDIS/NOAA. The differences between SST using both methods can vary from 1.10°C (Deschamps e Phulpin, 1980) to 5.00°C (NESDIS), with an average of 2.54°C, indicating that nonlinear correction must be used.

I. Introdução

A obtenção de valores precisos de Temperatura Superficial do Mar (TSM) é limitada por diversos fatores como a calibração do sensor, os algoritmos de correção atmosférica, os procedimentos de processamento de dados entre outros. Os métodos de calibração influenciam nas diferenças entre dados da TSM obtidos com o sensor e aqueles coletados *in situ*.

Os canais infravermelho do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) são calibrados a partir de dados obtidos quando o sensor visa o espaço (SC) e um alvo de calibração interno (IC) a bordo dos satélites.

O canal 3 apresenta uma resposta aproximadamente linear de número digital (count) por radiância, e para este, a calibração linear normalmente utilizada é satisfatória. A resposta dos canais 4 e 5 é não-linear, o que exige um método de calibração não-linear (Weinreb et al. 1990).

Normalmente esses ajustes são tabulados pela NESDIS como correções na temperatura de brilho, calculadas através de interpolações. Steyn-Ross et al. (1992) analisaram o método de correção não-linear para os canais infravermelho do AVHRR e determinaram um algoritmo simples que realiza as correções diretamente sobre a radiância.

A fim de se verificar as diferenças nos valores de temperatura gerados pela não-linearidade dos canais 4 e 5, calculou-se a TSM para uma imagem do Golfo Pérsico (NOAA-11) aplicando-se apenas a calibração linear, e posteriormente

a correção não-linear sugerida por Steyn-Ross et al. (1992).

Para o cálculo de TSM considerou-se como padrão o algoritmo fornecido pela NESDIS (NOAA). Além deste foram utilizados sete algoritmos publicados por diversos autores para o NOAA-7 que foram revisados por Pearce et al. (1989).

Analisou-se os resultados na forma de diferenças médias entre os demais algoritmos e o da NESDIS, assim como a diferença entre os valores calculados pelos métodos de calibração linear e não-linear.

II. Material e Métodos

O AVHRR-2, a bordo do NOAA 9, 11 e 12, possui 5 canais: canal 1 e 2 no espectro visível, canal 3 no infravermelho próximo (3.5-4 μm), enquanto a emissão no termal é detectada pelos canais 4 e 5 (10.5-11.5 μm e 11.5-12.5 μm). O NOAA 10 não possui canal 5.

A imagem utilizada para a análise corresponde a uma área de 512x512 pixels do Golfo Pérsico obtida pelo sensor AVHRR-2 (NOAA-11), no dia 7 de maio de 1990, em nó ascendente às 10:00 hs.

II.1. Calibração linear

O método de calibração padrão da NESDIS assume que a transformação de count para radiância é uma linha reta passando através do count do espaço (SC) no eixo do x, devido ao fato do espaço possuir radiância praticamente zero no infravermelho. A radiância (R)

do IC é calculada através da temperatura fornecida por 4 termômetros com resistência de platina a bordo do satélite.

Inicialmente, para a obtenção da radiância R foram testados dois métodos: a equação de corpo-negro de Planck expressa em número de onda central (ν_c), fornecido por Kidwell (1991):

$$R = B(\nu, T) = (c_1 \nu^3) / (e^{c_2 \nu / T} - 1) \quad (1)$$

E através da integral da expressão de corpo-negro de Planck ao longo da função filtro $\phi(\nu)$:

$$R = \frac{\nu_1 \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu, T) \phi(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \phi(\nu) d\nu} \quad (2)$$

onde ν_1 e ν_2 são respectivamente os limites de número de onda inferiores e superiores da função resposta espectral (função filtro), ϕ é a função resposta espectral, c_1 ($1.1910659e-5$) e c_2 (1.438833) as constantes de radiação de Planck.

As constantes de c_1 e c_2 são as utilizadas por Steyn-Ross et al. (1992), provenientes do 1986 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants (Cohen e Taylor, 1987), e diferem em algumas partes por milhão dos citados pela NESDIS.

A NESDIS melhorou a precisão da equação 1, através de um valor de número de onda central (ν_c) que força a equação 1 a reproduzir a radiância exata da equação 2.

Para cada canal infravermelho calculou-se a radiância através dos dois méto-

dos, para o intervalo de temperatura de 180 a 340 K, com a variação de 1 K. As diferenças entre os valores de radiância obtidas para cada canal foram calculadas e um teste de hipótese (H_0 : Diferença=0 para limite de 95% de confiança) foi realizado para verificar se os resultados apresentavam diferenças significativas.

A declividade na reta de calibração linear é dada por:

$$g = R / (IC - SC),$$

onde R é radiância total do alvo interno recebida pelo sensor, a uma temperatura T e IC a contagem do alvo de calibração interno.

Portanto a conversão linear de count (x) para radiância da cena (r_{lin}) fica:

$$r_{lin} = g \cdot (x - SC) \quad (3)$$

Esta equação foi usada a cada 50 linhas da imagem seguindo determinação da Nesdis.

II.2. Calibração não-linear

A equação (3) é válida para todos os counts (x) somente se a resposta do detector varia linearmente com a radiância. Entretanto o sensor dos canais 4 e 5 apresentam uma resposta não-linear.

A NESDIS publica tabelas de correção não-linear obtidas de testes pré-lançamento, onde o radiômetro visa o IC calibrado no laboratório. O procedimento é realizado para três temperaturas do IC, determinando uma curva para cada uma.

A aproximação linear for-

nece uma reta que intercepta a curva de resposta não-linear a radiância zero, e novamente na radiância do IC. Os desvios fora do ajuste linear definem a correção necessária (fig.1).

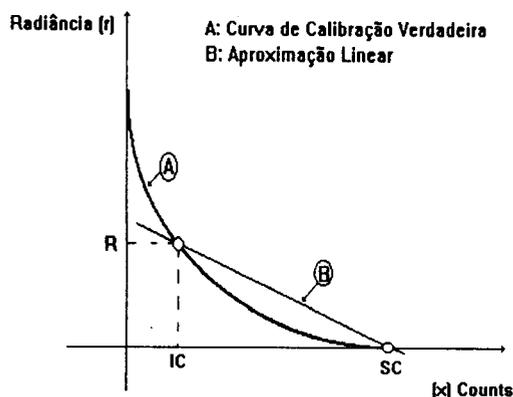


Figura 1

As tabelas de correção não-linear fornecidas pela NESDIS são aplicadas sobre a temperatura de brilho. Steyn-Ross et al. (1992) converteram as tabelas de correção de temperatura para radiância através de interpolação. Eles sugeriram que as correções fossem feitas sobre a radiância.

Todas as curvas de radiância passam pela origem (erro zero com radiância zero) e têm como segundo ponto a radiância R do alvo interno a uma temperatura específica (erro zero quando a radiância da cena se iguala a do alvo interno). Considerando o eixo x como a radiância aparente (r_{lin}) da cena e y o fator de correção (Δr), cada parábola pode ser expressa como:

$$\Delta r = kr_{lin}(r_{lin}-R) \quad (4)$$

onde k é o coeficiente quadrático para correção de parábolas ajustado por mínimos quadrados. Um coeficiente é obtido para cada temperatura do IC.

Uma vez determinado o coeficiente médio (k) obtém-se um algoritmo simples para correção não-linear dos canais 4 e 5, sem a necessidade de interpolar as tabelas da NESDIS.

Os valores de k (tabela 1) fornecidos por Steyn-Ross et al. (1992) foram utilizados neste trabalho.

A radiância correta da cena é dada por:

$$r = r_{lin} + \Delta r \quad (5)$$

Uma máscara foi utilizada com a finalidade de eliminar os pixels correspondentes às nuvens e à terra para que estes não gerassem grandes desvios na temperatura média. Somente então os algoritmos para correção atmosférica e determinação da TSM foram aplicados sobre a imagem.

II.3. Determinação da Temperatura de Superfície do Mar

Após a calibração e obtenção das temperaturas de brilho (inverso da equação de Planck) aplicou-se os algoritmos split-window utilizados por Pearce et al. (1989) e aquele fornecido pela NESDIS.

Os coeficientes dos algoritmos citados em Pearce et al. (1989) foram obtidos para o NOAA-7 e os da NESDIS para o NOAA-11, o que pode influenciar nos resultados. No entanto, estes foram utilizados devido a

necessidade de se obter mais de um valor de diferença na temperatura obtida pela calibração linear e a não-linear para um estudo comparativo.

Os coeficientes dos algoritmos utilizados por Pearce et al. (1989) estão na tabela 2. A forma genérica é:

$$TSM = a + b.Tb4 + c.Tb5 \quad (6)$$

Os coeficientes do algoritmo fornecido pela NESDIS estão na tabela 3. O algoritmo tem a seguinte forma:

$$TSM = a.T4 + b.(T4-T5) + c.(T4-T5).(secZ-1) - d.(secZ-1) - e \quad (7)$$

O ângulo de visada não foi considerado nesta análise.

Após a obtenção da temperatura calculou-se a diferença da temperatura média entre as imagens obtidas a partir dos algoritmos citados por Pearce et al. (1989) e a da NESDIS, utilizando-se os métodos linear e não-linear (tabela 4).

Para se verificar a variação de temperatura existente entre os dois métodos efetuou-se a diferença entre as imagens calibradas por ambos (tabela 5).

O algoritmo da NESDIS foi considerado como padrão porque os coeficientes são do NOAA-11, sensor que imageou a área, enquanto os demais são do NOAA-7. Outro fator é que os coeficientes da NESDIS são globais e fornecidos regularmente.

III. Resultados

A figura 2 apresenta o gráfico

com a diferença de radiância entre a resposta normalizada (equação 2) e o número de onda central (equação 1) para cada canal. No canal 3 as diferenças aumentam continuamente a partir de 285 K, para o canal 4 estas se mostram pequenas e aproximadamente constantes, e no 5 as diferenças aumentam gradativamente com a temperatura.

Embora o gráfico mostre diferenças de radiância entre os métodos, os testes de hipótese realizados mostraram que elas não são significativas. Portanto utilizou-se a equação (1) com o número de onda central (ν_c) fornecido por Kidwell (1991) para o cálculo da radiância, assim como o seu inverso para a obtenção da temperatura de brilho.

A tabela 4 apresenta as médias das diferenças entre as TSM calculadas a partir dos algoritmos citados por Pearce et al. (1989) e o da NESDIS. O algoritmo de McClain et al. (1985) apresentou os menores valores extremos e as menores médias, tanto para calibração linear quanto não-linear. Como o método MCSST utilizado pela NESDIS foi originado a partir de algoritmos de correção atmosférica determinados por McClain, este resultado era esperado.

As maiores diferenças foram obtidas através de Deschamps e Phulpin (1980), -12.7°C para o método linear e -13.6°C para o não-linear.

De maneira geral as médias das diferenças tendem a aumentar com o método não-linear, com exceção dos algoritmos de Maul (1983) e Strong e McClain (1984). Verifica-se uma grande variabi-

Diferença entre Resp. Norm. e CWN

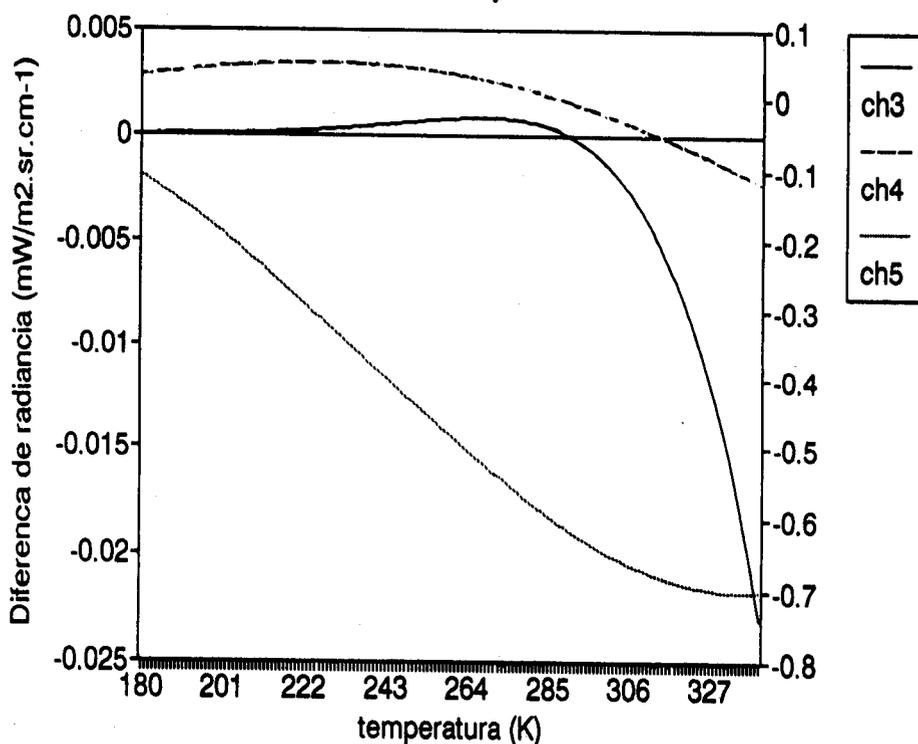


figura 2

lidade dos valores das médias dos algoritmos em relação a NESDIS.

Os valores extremos também podem estar altos devido a máscara, que pode não ter eliminado todos os pixels de nuvens e terra.

A tabela 5 mostra as diferenças médias entre as temperaturas obtidas através da calibração linear e a não-linear. As menores diferenças foram obtidas com o algoritmo de Deschamps, valor mínimo de 1.10°C e máximo de 3.70°C. As médias se mostram aproximadamente constantes e bastante significativas evidenciando a necessidade de se aplicar a calibração não-linear.

IV. Conclusões

Para a transformação de temperatura para radiancia e vice-

versa foi utilizada a equação(1) com o número de onda central (ν_c), pois verificou-se que não há diferença significativa entre esta e a (2), que integra a expressão de corpo-negro de Planck. Sobretudo porque o esforço computacional é muito menor. Estima-se que o programa completo para obtenção de TSM não ultrapasse 5 min para rodar no IBM 3090 da URG.

Ficou evidente a necessidade de se aplicar a calibração não-linear, visto que a diferença média de TSM entre os dois métodos para os algoritmos analisados foi de 2.54° C.

Aplicou-se o algoritmo fornecido por Steyn-Ross et al.(1992) para correção não-linear a partir da radiancia. Utilizou-se um k para cada canal e sensor, obtidos a partir das tabelas de correção de temperatura de brilho fornecidas pela NESDIS.

Tendo em vista os resultados obtidos no trabalho, concluiu-se que deve ser utilizado o algoritmo da NESDIS para determinação de TSM. Posteriormente, estimativas mais precisas podem ser obtidas se forem determinados os coeficientes regionais para o MCSST.

S. Brown, Nonlinearity Corrections in Calibration of Advanced Very High Resolution Radiometer Infrared Channels, *Journal of Geophysical Research* 95 (c5) 7381-7388, 1990.

V. Referências

K.B. Kidwell, NOAA Polar Orbiter Data Guide (TIROS-N, NOAA 6-1), NOAA/NESDIS - NCDC Washington, DC, 1991.

E.P. McClain, W.G. Pichel, and C.C. Walton, Comparative Performance of AVHRR-based Multichannel Sea Surface Temperatures, *Journal of Geophysical Research* 90 (C6) 11587-11601, 1984.

L.M. McMillin and D.S. Crosby, Theory and Validation of the Multiple Window Sea Surface Temperature Technique, *Journal of Geophysical Research* 89 (C3) 3355-3661, 1984.

A.F. Pearce, A.J. Prata and C.R. Manning, Comparison of NOAA-2 Sea Surface Temperatures with Surface Measurements in Coastal Waters, *Int. J. Remote Sensing* 10 (1) 37-52, 1989.

D.A. Steyn-Ross and M.L. Steyn-Ross, Radiance Calibration for Very High Resolution Radiometer Infrared Channels, *Journal of Geophysical Research* 97 C4 5551-5568, 1992.

M.P. Weinreb, G. Hamilton and

5551-5568,1992.

M.P. Weinreb, G. Hamilton and
S.Brown, Nonlinearity Cor-
rections in Calibration of
Advanced Very High
Resolution Radiometer Infra-
red Channels, *Journal of
Geophysical Research* 95 (c5)
7381-7388,1990.

| Satélite | canal | k/10 ⁻⁴ |
|----------------|-------|--------------------|
| NOAA 9 | 4 | 6.01 |
| NOAA 9 | 5 | 2.92 |
| NOAA 10 | 4 | 6.97 |
| NOAA 11 (1981) | 4 | 10.01 |
| NOAA 11 (1988) | 4 | 8.77 |
| NOAA 11 | 5 | 2.79 |
| NOAA 12 | 4 | 6.28 |
| NOAA 12 | 5 | 2.33 |

Tabela 1 - Coeficientes quadráticos médios (k) fornecidos por Steyn-Ross et al. (1992)

| Algoritmo | Coeficiente | | |
|----------------------------|-------------|-------|--------|
| | a | b | c |
| Barton (1985) | -0.420 | 3.760 | -2.760 |
| McMillin e Crosby (1984) | -0.582 | 3.702 | -2.702 |
| Maul (1983) | 0.320 | 3.350 | -2.350 |
| McClain et al. (1985) | -1.305 | 4.081 | -3.046 |
| Strong e McClain (1984) | 0.210 | 3.615 | -2.580 |
| Deschamps e Phulpin (1980) | -1.280 | 3.100 | -2.100 |
| Llewellyn-Jones (1984) | -2.058 | 3.908 | -2.852 |

Tabela 2 - Coeficientes dos algoritmos utilizados por Pearce et al. (1989)

| Data | a | b | c | d | e |
|----------|---------|----------|----------|--------|---------|
| 14/11/88 | 0.97120 | 2.066300 | 1.898300 | 1.9790 | 269.790 |
| 27/09/89 | 1.01345 | 2.659762 | 0.526548 | 0.0000 | 277.742 |
| 18/04/90 | 1.01550 | 2.500000 | 0.730000 | 0.0000 | 277.990 |

Tabela 3- Coeficientes para NOAA-11 utilizados pela NESDIS

| | Linear | | | Não-Linear | | |
|-----------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | mínimo | médio | máximo | mínimo | médio | máximo |
| Barton | -5.00 | -0.154 | 1.30 | -5.30 | -0.448 | 1.10 |
| Crosby | -5.70 | -0.349 | 1.20 | -6.10 | -0.640 | 1.10 |
| Maul | -8.50 | 0.391 | 3.10 | -9.20 | -0.085 | 2.70 |
| McClain | -2.00 | -0.090 | 0.40 | -2.10 | -0.153 | 0.30 |
| Strong | -5.50 | 1.362 | 3.10 | -6.00 | 0.862 | 2.80 |
| Ljones | -4.30 | -0.344 | 0.60 | 4.60 | -0.534 | -0.50 |
| Deschamps | -12.70 | -1.195 | 2.10 | -13.60 | -1.867 | -1.60 |

Tabela 4 - Diferenças de temperatura (°C) média, mínima e máxima entre algoritmos de diversos autores daquele utilizado pela NESDIS, com calibração linear e não-linear.

| | mínimo | médio | máximo |
|-----------|--------|-------|--------|
| Nesdis | 1.50 | 2.50 | 5.00 |
| Barton | 1.30 | 2.57 | 4.50 |
| Crosby | 1.30 | 2.55 | 4.40 |
| Maul | 1.20 | 2.31 | 4.00 |
| McClain | 1.50 | 2.76 | 4.70 |
| Strong | 1.30 | 2.50 | 4.30 |
| Ljones | 1.30 | 2.67 | 4.50 |
| Deschamps | 1.10 | 2.17 | 3.70 |
| média | 1.31 | 2.54 | 4.38 |

Tabela 5 - Diferença de temperatura (°C) para cada algoritmo calibrado linear e não-linearmente.