

Avaliação da acurácia das temperaturas da superfície do mar obtidas por satélite para a região Sul-Sudeste da costa brasileira

CARLOS E. S. DE ARAUJO¹

JOÃO A. LORENZZETTI¹

¹INPE--Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515, 12201- 097 São José dos Campos, SP, Brasil
{salles, loren}@ltid.inpe.br

Abstract. The accuracies of the global AVHRR Sea Surface Temperature (SST) algorithms, derived from NOAA 11 and 12 satellites, were determined from comparisons with a match-up data set of drifting buoy measurements for the southeast coast of Brazil. The NOAA 11 algorithm had a RMSD of 0.87°C with a bias of 0.24°C, and the NOAA 12 algorithm presented a RMSD of 0.94°C and a bias of 0.32°C. In order to eliminate the bias and reduce the RMSD's, new regional algorithms were derived for the region, with two different approaches. In the first, regression lines are used to correct the SST values generated by the global algorithm. In the second, new split-window equations were derived by multiple regression models. The application of both methods leads to RMSD's improvements, with no significant statistical differences between them.

Keywords: AVHRR, SST regional algorithms, drifting buoy measurements

1 Introdução

Os padrões de temperatura da superfície do mar (TSM), variando em escalas espaciais de local até global, e em escalas temporais de horas até meses ou anos, são de interesse para pesquisadores de diferentes áreas, principalmente os meteorologistas e os oceanógrafos.

Desvios significativos de TSM em relação as médias de longo período, conhecidos como anomalias, são empregados em estudos de dinâmica climática. Neste tópico temos, por exemplo, o fenômeno do “El Niño”, que consiste numa anomalia quente das partes oriental e central do Pacífico leste tropical, verificada com uma periodicidade entre 3 e 10 anos e que produz conseqüências climáticas e econômicas de grande alcance a nível mundial.

O estudo dos campos de TSM em meso-escala é de grande interesse, principalmente nos processos de instabilidade dinâmica das correntes oceânicas, responsáveis pela geração de meandros e vórtices, e nos processos de ressurgência. Estes processos propiciam a troca de energia, massa e nutrientes entre diferentes tipos de águas de diferentes regiões. Apesar de serem fenômenos intrinsecamente físicos, possuem também uma influência bastante importante sobre vários processos biológicos, regulando atividades sócio-econômicas como, por exemplo, a pesca.

A distribuição irregular das observações convencionais dos chamados navios de oportunidade constitui um antigo problema no delineamento e monitoramento da temperatura da superfície dos oceanos. Isto freqüentemente resulta em grandes regiões, particularmente nos trópicos e no hemisfério sul, desprovidas de observações. O uso crescente de bóias ancoradas e

de deriva ainda representa uma tímida contribuição para a melhoria dessa situação.

Na década de 70, radiômetros operando no infravermelho a bordo de satélites, passaram a ser usados para estimar a temperatura da superfície dos oceanos de forma sinótica. Os primeiros sensores utilizados para aplicações oceanográficas voaram a bordo dos satélites meteorológicos geoestacionários (Meteosat, GOES, GMS, INSAT) e também dos satélites de órbita polar da série NOAA (NOAAs 2, 3, 4 e 5), que possuíam dois radiômetros distintos: o radiômetro de varredura (SR) e o radiômetro de resolução muito alta (VHRR). Estes sensores apresentavam apenas dois canais: um no visível e outro no infravermelho termal, centrado em $11\mu\text{m}$. Segundo Barbieri *et al.* (1983), os algoritmos usados para extrair a TSM dos dados obtidos por estes sensores sofriam de algumas deficiências tais como: nuvens no campo de visada, correção inadequada para os constituintes atmosféricos e a incapacidade de perceber variações na umidade em baixas latitudes.

Em 1978, iniciou-se uma nova geração de satélites meteorológicos de órbita polar, com o lançamento do satélite TIROS-N, que carregava o radiômetro avançado de resolução muito alta - AVHRR. Este sensor possuía um canal termal adicional, centrado em $3,7\mu\text{m}$, o que possibilitou o uso de uma técnica de absorção diferenciada da radiação (devida à atenuação pelo vapor d'água) para a correção atmosférica. Esta técnica estava restrita apenas para uso noturno, uma vez que este novo canal, devido ao seu curto comprimento de onda, incluía uma porcentagem significativa de radiação solar refletida durante o dia.

Em 1981 tornou-se disponível um novo radiômetro infravermelho de cinco bandas (AVHRR-II), através da incorporação de mais uma banda termal na janela atmosférica de $10\text{-}12\mu\text{m}$. Com o uso da técnica de absorção diferenciada, este sensor, que operou nos satélites NOAAs 7, 9 e 11 e atualmente opera nos satélites NOAA 12 e NOAA 14, possibilitou uma correção mais acurada para a presença de vapor d'água na atmosfera, inclusive nas imagens diurnas.

A partir da década de 80, utilizando-se os dados infravermelhos do sensor AVHRR-II, obteve-se estimativas da TSM de forma repetida e consistente para os oceanos. Baseado no método de correção atmosférica multicanal (MCSST), foram e são desenvolvidos constantemente algoritmos para determinação da TSM, através de regressões entre temperaturas *in situ* e temperaturas de brilho, derivadas de satélite.

Na medida em que as temperaturas da superfície do mar derivadas de satélite se tornaram mais acuradas, ficou claro que a maioria dos dados de TSM obtidos *in situ*, de forma rotineira por navios de oportunidade, não apresentavam acurácia suficiente para permitir comparações de qualidade com os dados de satélite. Isto se tornou particularmente óbvio quando Strong e McClain (1984) compararam as estatísticas das temperaturas obtidas pelo método MCSST com dados de navio, bóias ancoradas e bóias de deriva. Embora as diferenças médias entre os dados de TSM seja pequena, o espalhamento é consideravelmente maior nas comparações satélite-navio do que nas comparações satélite-bóia (**Tabela 1**). Uma vez que dados de temperatura obtidos *in situ* por radiômetros são raros e muito caros de se obter, as bóias de deriva parecem ser, segundo Strong e McClain (1984) a melhor alternativa de se validar os dados de TSM obtidos por satélite.

Coll *et al.* (1993), ressaltam a importância do desenvolvimento de algoritmos regionais para a correção atmosférica na determinação da TSM, uma vez que a absorção causada pelos constituintes atmosféricos (vapor d'água, aerossóis, ozônio etc.) varia temporalmente e espacialmente a nível regional. A absorção por estes constituintes, além de introduzir um desvio no valor absoluto da temperatura da superfície do mar, provoca um efeito nos gradientes horizontais de temperatura, de modo que os gradientes reais são reduzidos por um fator proporcional à transmitância atmosférica.

TABELA 1 - COMPARAÇÕES DE TSM *IN SITU* COM TSM DE SATÉLITE

fonte dos dados	no. de observações	Bias*	RMSD**
Navios	24792	-0,43°C	1,81°C
bóias ancoradas	240	-0,47°C	1,05°C
bóias de deriva	472	-0,22°C	0,68°C

* média das diferenças **raiz quadrada da diferença média quadrática

FONTE: Strong e McClain (1984)

Os algoritmos de TSM que encontram-se operacionalmente em uso foram derivados através de regressões lineares com dados *in situ* de bases globais. Estas bases de dados, representam principalmente os oceanos Atlântico Norte e Pacífico, onde os levantamentos são realizados em maior número e as séries históricas disponíveis são mais longas. Considerando que as variações temporais e espaciais nos constituintes atmosféricos influenciam a precisão e acurácia dos algoritmos de TSM, faz-se necessário avaliar periodicamente, com dados de campo, o desempenho destes algoritmos a nível regional.

Tendo por base estes fatos e considerando a necessidade constante de se aprimorar as estimativas de TSM por satélite, testou-se, neste trabalho, o desempenho dos algoritmos globais MCSST para a região oeste do Atlântico Sul, através de comparações com dados de campo. A partir dos resultados deste teste, foram gerados novos algoritmos regionais para a determinação da TSM, utilizando-se uma base de dados de temperatura de bóias de deriva, em conjunto com um banco de imagens de TSM, derivadas a partir dos dados do sensor AVHRR/NOAA.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

As imagens de satélite utilizadas neste trabalho foram geradas a partir dos dados do sensor AVHRR-II, a bordo dos satélites NOAA-11 e NOAA-12, e no período de fevereiro de 1993 a junho de 1994. As imagens foram adquiridas entre 9:30 e 11:00 GMT para o satélite NOAA 11 e entre 18:30 e 20:56 GMT para o satélite NOAA 12. Elas abrangem a região da costa sudeste brasileira, entre as latitudes de 22°S a 34°S.

As imagens foram recebidas no modo de leitura direta de alta resolução, pela estação de

recepção NOAA/HRPT do INPE, situada em Cachoeira Paulista-SP. Os dados foram gravados em fitas magnéticas do tipo CCT de alta capacidade (6250 BPI), no formato 1-B, e encaminhados ao INPE de São José dos Campos para posterior processamento e cálculo da temperatura da superfície do mar.

O AVHRR-II é um radiômetro de cinco canais, instalado a bordo dos satélites NOAA da série TIROS-N. Possui um ângulo de varredura de 55,4° para cada lado do nadir, com uma cobertura total de varredura no terreno de aproximadamente 2700 Km. O ângulo de visada instantâneo é de 1,3 mrad, conferindo uma resolução espacial no terreno da ordem de 1,1x1,1 Km no nadir e de 2,4x6,9 Km para os ângulos máximos de varredura (Kidwell, 1995). Os cinco canais do sensor AVHRR-II são distribuídos do visível ao infravermelho termal, de acordo com a **Tabela 2.1** abaixo.

TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DOS CANAIS DO SENSOR AVHRR-II

Canal	Intervalo Espectral (μm)	Tipo de Espectro
1	0,55 - 0,68	Luz solar refletida no visível
2	0,72 - 1,10	Luz solar refletida no infravermelho (IR) próximo
3	3,55 - 3,93	IR solar refletido e IR emitido (termal)
4	10,33 - 11,3	IR termal emitido (termal)
5	11,5 - 12,5	IR termal emitido (termal)

As cinco bandas espectrais do sensor AVHRR são digitalizadas em uma resolução de 10 bits (1024 níveis), em incrementos iguais de energia. Os canais termais são calibrados radiometricamente a bordo do satélite para cada linha de varredura e permitem a determinação da radiância das cenas em cada canal. A conversão de radiância para temperatura de brilho é feita utilizando-se a equação inversa de radiação de Planck com um número de onda central de cada banda, fornecido pela NOAA. Os canais termais, combinados entre si, permitem corrigir o efeito atenuador do conteúdo variável de vapor d'água na atmosfera, e desta forma derivar temperaturas da superfície do mar muito mais acuradas do que era possível com os sensores de gerações anteriores.

As bóias de deriva utilizadas neste trabalho foram lançadas pela equipe do INPE, como parte do projeto COROAS-Circulação Oceânica da Região Oeste do Atlântico Sul, e operaram no período de maio de 1993 a junho de 1994. Os derivadores lançados, são constituídos de uma bóia esférica de flutuação em sua parte superior, com aproximadamente 35 cm de diâmetro. Nesta bóia são acondicionados o sensor de temperatura (termistor), as baterias para fornecimento de energia, uma antena e uma plataforma para transmissão de dados (PTT) pelo sistema Argos. Na parte inferior, estes derivadores possuem uma longa vela de formato cilíndrico com 7 metros de comprimento, do tipo "meia furada", para aumentar o arrasto com a água, inserindo a bóia na corrente oceânica e conseqüentemente diminuindo a ação do vento sobre a mesma. Devido à simplicidade de concepção e ao baixo custo de fabricação, estas bóias são denominadas

derivadores de baixo custo-LCDs.

Os termistores destes derivadores são capazes de fornecer valores de temperatura entre -5°C e 45°C, que são transmitidos para o sistema Argos com uma resolução de 10 bits. Embora a precisão aproximada seja de 0,05°C ($\Delta T/\text{resolução}$), a acurácia dos termistores, segundo seu fabricante (YSI,1993), é próxima de 0,15°C.

O sistema Argos, oferece a capacidade de localização de plataformas fixas ou móveis e a coleta de dados ambientais através dos satélites operacionais de órbita polar da série NOAA. Cada satélite é equipado com um sistema de coleta de dados e localização (DCLS), que recebe e retransmite em tempo real, ou grava a bordo, todas as transmissões das plataformas que se encontram visíveis durante a passagem do satélite (Argos, 1989).

Os dados de posicionamento são obtidos pelo cálculo do efeito Doppler (provocado pelo movimento relativo entre o satélite e os derivadores) nas frequências recebidas dentro de um sobrevôo, visto que as frequências transmitidas pelas PTTs são praticamente idênticas. Dependendo do número de mensagens coletadas, do intervalo mínimo entre a primeira e última mensagens recebidas e da estabilidade do transmissor a bordo do LCD, obtém-se a posição do derivador com uma acurácia de localização entre 150 metros e 1 Km.

2.2 Métodos

A metodologia utilizada neste trabalho divide-se em quatro partes principais: seleção e verificação da consistência dos dados de bóia de deriva; processamento das imagens; comparação dos dados de temperatura de bóia com os dados de TSM, calculados com os algoritmos globais MCSST; e derivação de um algoritmo regional para cálculo da TSM.

Para a comparação com dados de satélite, escolheu-se os dados de bóia com o menor intervalo temporal possível entre a aquisição do dado *in situ* e a passagem do satélite. Seguindo a metodologia proposta por Strong e McClain (1984), foram selecionados apenas os dados de derivador com intervalo temporal máximo de ± 12 horas em relação as passagens de satélite. Em alguns casos onde não foi possível obter dados coincidentes no domínio do espaço, de forma similar, permitiu-se um distanciamento máximo de 25 Km.

As imagens brutas recebidas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Cachoeira Paulista-SP foram processadas com o sistema PC-Seapak, no Laboratório de Análises Oceanográficas do INPE de São José dos Campos-SP. A rotina TPAVHRR é responsável pela ingestão das imagens no sistema PC-Seapak. Esta rotina realiza a leitura de uma área selecionada da imagem, em formato 1-B, presente na fita CCT. Os canais termais são calibrados radiometricamente, escalonados e gravados como arquivos distintos. A rotina TPAVHRR, gera ainda a TSM, que é gravada como um novo arquivo. Os algoritmos globais utilizados operacionalmente no INPE para o cálculo da TSM nas imagens diurnas são os seguintes:

NOAA 11 MCSST DAY SPLIT

$$\text{TSM} = 0,979224(\text{T11}) + 2,361743(\text{T11}-\text{T12}) + 0,33084(\text{SEC } \theta - 1) (\text{T11}-\text{T12}) - 267,029$$

NOAA 12 MCSST DAY SPLIT

$$\text{TSM} = 0,963563(\text{T11}) + 2,57921(\text{T11}-\text{T12}) + 0,242598(\text{SEC } \theta - 1) (\text{T11}-\text{T12}) - 263,006$$

onde T11 e T12 são as temperaturas de brilho dos canais 4(10,3-11,3 μ m) e 5(11,5-12,5 μ m) em graus Kelvin, θ é o ângulo zenital do satélite e TSM é a temperatura da superfície do mar em graus Celsius.

A comparação dos dados de satélite com os dados de bóia foi baseada na metodologia proposta por Barbieri *et al.* (1983). Localizou-se nas imagens as posições dos derivadores para as áreas que apresentavam-se livres de nuvens, computando-se numa planilha a temperatura da imagem para cada posição das bóias. O método de computação utilizado foi o do píxel mais quente, para um janelamento de 3x3 píxels(valor máximo de temperatura numa matriz de 9 elementos), centrado na posição da bóia. Além dos valores máximos, foram computados os desvios padrões para os canais termais 4 , 5 e imagens de TSM.

Calculou-se as diferenças médias de temperatura [$\mu(T_{SAT} - T_{DER})$] e as raízes quadradas dos erros médios quadráticos (RMSD), para os pares de temperatura satélite-bóia. As RMSDs obtidas foram comparadas, avaliando-se a existência de variações significativas ao longo do ano e de variações de satélite para satélite.

Além disto, foram calculadas as regressões lineares simples e os coeficientes de correlação para o conjunto dos pares ordenados (T_{SAT} , T_{DER}) de cada satélite, obtendo-se equações de reta da forma $T_{DER} = \mathbf{a} \times T_{SAT} + \mathbf{b}$, onde \mathbf{a} e \mathbf{b} são os coeficientes obtidos na regressão. As equações de regressão obtidas foram aplicadas nos valores de T_{SAT} , gerando-se valores de temperatura da superfície corrigidos (T_{COR}). As RMSDs foram então novamente calculadas para estes novos valores corrigidos. A aplicação destes algoritmos eliminou os desvios relativos a média das diferenças $T_{SAT} - T_{DER}$ (“bias”).

Derivou-se um novo algoritmo de TSM regional para cada satélite (NOAA 11 e 12), empregando-se o método multicanal de correção atmosférica. Na determinação dos coeficientes deste novo algoritmo, regressões lineares múltiplas entre as temperaturas de brilho do canal 4, diferenças de temperatura entre os canais 4 e 5, e as temperaturas de bóia foram realizadas. Incluiu-se também na derivação um termo corretivo para o ângulo de visada do sensor, de forma a obter-se equações na seguinte forma:

$$T_{REG} = \beta_1 \times T11 + \beta_2 \times (T11-T12) + \beta_3 \times (\text{SEC } \theta - 1) \times (T11-T12) + \beta_0$$

onde T11 e T12 são as temperaturas de brilho dos canais 4(10,3-11,3 μ m) e 5(11,5-12,5 μ m) em graus Kelvin, θ é o ângulo zenital do satélite em graus, T_{REG} é a temperatura da superfície do mar obtida pelo algoritmo regional, e β_n são os coeficientes determinados na regressão.

A significância de cada coeficiente determinado na regressão foi testada para um nível de 5%. Nos casos em que o valor zero esteve contido neste intervalo de confiança, realizou-se uma nova regressão linear múltipla, excluindo-se o termo relativo ao coeficiente em questão.

As RMSDs relativas aos algoritmos regionais foram calculadas utilizando-se as temperaturas previstas por estes e as temperaturas de derivador em cada série.

Na validação destes algoritmos, testou-se cada equação aplicando-a a uma série de dados independente daquela que a originou na regressão. Foram então calculadas novas RMSDs baseadas nestes testes cruzados entre as séries de dados, comparando-se os valores obtidos com

as RMSDs calculadas anteriormente. Desta forma, os algoritmos obtidos na série “Aleatório-1” foram testados na série “Aleatório 2” e vice versa.

Finalmente, para se escolher entre um novo algoritmo regional ou uma equação simples para a correção de temperatura, utilizou-se, além da comparação dos coeficientes de correlação das retas (R^2) e da comparação das RMSDs, um teste de significância para a igualdade entre os valores da T_{REG} e da T_{COR} previstas.

3 Resultados

As séries de dados (NOAA 11 e 12), denominadas de “Total”, foram subdivididas em 2 séries aleatórias e em séries de “Verão” (outubro a abril) e “Inverno” (maio a setembro). Para a avaliação da acurácia do algoritmo global de cada satélite, calculou-se as médias, os desvios padrão e as RMSDs para as diferenças $T_{SAT} - T_{DER}$ em cada série (**Tabelas 3 e 4**).

TABELA 3 - AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DE $T_{SAT} - T_{DER}$ PARA O NOAA-11

Série	Registros	bias: μ (°C)	σ (°C)	RMSD (°C)
Total	291	0,24	0,83	0,87
Aleatório-1	146	0,3	0,78	0,84
Aleatório-2	145	0,18	0,87	0,89
Verão	66	0,55	0,58	0,79
Inverno	225	0,15	0,87	0,89

TABELA 4 - AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DE $T_{SAT} - T_{DER}$ PARA O NOAA-12

Série	Registros	bias: μ (°C)	σ (°C)	RMSD (°C)
Total	159	0,32	0,89	0,94
Aleatório-1	80	0,4	0,91	0,99
Aleatório-2	79	0,24	0,86	0,9
Verão	65	-0,09	0,86	0,86
Inverno	94	0,6	0,79	1,0

Comparando-se os resultados obtidos, percebe-se que o algoritmo global utilizado para o satélite NOAA 11 possui uma acurácia melhor ($<$ RMSDs) do que o algoritmo utilizado para o NOAA 12. Apesar dos meses de verão serem mais úmidos, mostraram acurácias melhores do que os meses de inverno, para ambos os satélites, contrariando o esperado. As séries NOAA12-Inverno e NOAA11-Verão apresentaram os maiores desvios tendenciosos (“bias”) de T_{SAT} em relação a T_{DER} .

A realização de regressões lineares simples entre T_{SAT} e T_{DER} , gerou equações de reta para cada série, na forma $T_{DER} = \mathbf{a} \times T_{SAT} + \mathbf{b}$. A aplicação destas novas equações nos valores T_{SAT} permitiu a obtenção de TSMs corrigidas dos desvios tendenciosos observados (T_{COR}). Os valores de T_{COR} foram então comparados com os valores de T_{DER} em cada série, calculando-se novas RMSDs. Os coeficientes **a**, **b** e de determinação (R^2) das retas obtidas, assim como a

acurácia destes novos algoritmos para a correção de T_{SAT} , podem ser observados nas Tabelas 5 e 6.

TABELA 5 - RETAS DE REGRESSÃO $T_{SAT} \times T_{DER}$ PARA O NOAA-11

Série	a	b	R ²	RMSD
Total	0,7127	5,6961	0,74	0,69
Aleatório-1	0,7141	5,6188	0,78	0,63
Aleatório-2	0,713	5,7381	0,71	0,74
Verão	0,8431	2,7844	0,91	0,5
Inverno	0,6704	6,6052	0,67	0,71

TABELA 6 - RETAS DE REGRESSÃO $T_{SAT} \times T_{DER}$ PARA O NOAA-12

Série	a	b	R ²	RMSD
Total	1,0496	- 1,4464	0,90	0,88
Aleatório-1	1,0968	- 2,5993	0,91	0,87
Aleatório-2	1,0054	-0,3622	0,90	0,86
Verão	0,3384	16,763	0,42	0,44
Inverno	0,9644	0,1422	0,80	0,79

A aplicação das equações de reta na correção dos desvios de temperatura das séries Total, Aleatório-1 e Aleatório-2 do satélite NOAA 11, resultaram numa melhoria média de 0,18°C na acurácia. Para o NOAA 12, a melhoria média na acurácia foi de 0,07°C. Este ganho foi calculado de acordo com a fórmula abaixo. Após a correção dos desvios, os dados de temperatura relativos ao satélite NOAA 11 revelaram uma acurácia maior do que os dados do NOAA 12, da ordem de 0,18°C.

$$\text{Ganho de acurácia} = \frac{1}{3} \times \sum_S \text{RMSD}_R - \text{RMSD}_G$$

Onde S são as séries Total, Aleatório-1 e Aleatório-2; RMSD_R representa as acurácias calculadas para as retas de regressão e RMSD_G representa as acurácias do algoritmo global para as séries supracitadas.

As séries de Verão apresentaram melhorias acentuadas na acurácia. Para o NOAA 11 verificou-se um aumento de 0,29°C, enquanto que para o NOAA 12 registrou-se um aumento de 0,42°C. Porém, este resultado do NOAA 12 não pode ser considerado expressivo, pois obteve-se uma fraca correlação entre T_{SAT} e T_{DER} na série. O baixo valor de R^2 (0,42) pode ser atribuído ao pequeno intervalo de temperatura analisado na série de Verão do NOAA 12, influenciando também nos valores anômalos obtidos para os coeficientes **a** e **b** da reta de regressão para este

caso. Nas séries de Inverno, houve um ganho de acurácia de 0,18°C para o NOAA 11 e de 0,21°C para o NOAA 12. Na comparação sazonal, o Verão demonstrou ter uma acurácia pelo menos 0,2°C maior do que o Inverno.

A menor acurácia obtida para o Inverno pode estar associada a um erro de localização da posição (Latitude, Longitude) dos derivadores nas imagens de TSM. Durante o inverno ocorre sobre a plataforma a penetração de um ramo costeiro da Corrente das Malvinas, vindo de sul, misturando-se com as águas típicas de plataforma e também com as águas quentes da CB, oriundas de NE. Esta penetração cria muita instabilidade sobre as regiões de plataforma e borda oeste da CB, gerando, de uma forma geral, gradientes termais superficiais mais intensos do que no verão. Exatamente nestas regiões, encontravam-se a maioria dos derivadores utilizados neste trabalho.

Empregando-se o método multicanal de correção atmosférica, derivou-se algoritmos regionais para as séries de dados Total, Aleatório-1 e Aleatório-2, de ambos os satélites. Na determinação dos coeficientes dos novos algoritmos, utilizou-se regressões lineares múltiplas, gerando-se equações na seguinte forma:

$$T_{DER} = \beta_1 \times T11 + \beta_2 \times (T11-T12) + \beta_3 \times (SEC \theta -1) \times (T11-T12) + \beta_0$$

Avaliou-se o erro(desvio) padrão para cada coeficiente. Realizou-se também um teste de significância a um nível de 5% para se determinar a nulidade ou não dos coeficientes β . Os coeficientes β_3 das séries Aleatório-1 e Aleatório-2 do NOAA 11, e Aleatório-1 do NOAA 12, mostraram probabilidades de nulidade maiores do que o nível de significância adotado (0,05). Realizou-se portanto novas regressões, denominadas de “reduzida”, excluindo-se do algoritmo o termo $(SEC \theta -1) \times (T11-T12)$. De uma forma geral, os algoritmos revelaram uma fraca dependência deste termo, o que pode ser explicado pela distribuição dos ângulos zenitais nas imagens ser predominantemente menor do que 40°, principalmente para o NOAA 11. Segundo McClain *et al.* (1985), a adição do termo corretivo para o ângulo de visada funciona melhor para ângulos entre 40° e 53°.

A aplicação destas novas equações permitiu a obtenção das TSMs regionais (T_{REG}). Os valores de T_{REG} foram então comparados com os valores de T_{DER} em cada série, determinando-se as RMSDs dos algoritmos regionais. Calculou-se os coeficientes de determinação múltipla (R^2) das retas obtidas, assim como a acurácia dos novos algoritmos regionais, comparando-os com o algoritmo global. Os resultados, assim como os coeficientes β_n obtidos nas regressões, podem ser observados nas **Tabelas 7 e 8**.

TABELA 7 - RETAS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O NOAA-11

Algoritmo	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2	RMSD
Global	- 267,03	0,9792	2,3617	0,3308	---	0,87
Total	-207,36	0,7792	0,7601	-0,6575	0,67	0,78
Aleatório-1	-203,95	0,7675	0,7603	-0,5853	0,68	0,75
Aleatório-2	-212,04	0,7953	0,7736	-0,9422	0,65	0,81
Aleatório-1 (reduzido)	-211,77	0,7942	0,7055	---	0,68	0,75
Aleatório-2 (reduzido)	-212,62	0,7973	0,6953	---	0,65	0,82

TABELA 8 - RETAS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O NOAA-12

Algoritmo	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2	RMSD
Global	-263,01	0,9636	2,5792	0,2426	---	0,94
Total	-264,27	0,9667	2,7657	0,5635	0,90	0,89
Aleatório-1	-272,96	0,995	3,0625	0,3723	0,90	0,9
Aleatório-2	-254,46	0,9343	2,5186	0,6839	0,90	0,85
Aleatório-1 (reduzido)	-260	0,9501	3,2434	---	0,90	0,92

Os algoritmos regionais, derivados para as séries do satélite NOAA 12, revelaram-se mais similares ao algoritmo global do que os algoritmos obtidos para as séries do NOAA 11. Este fato pode ser verificado através da comparação entre os coeficientes β_n da equação global e os coeficientes β_n das outras equações. Os maiores coeficientes de determinação (R^2) encontrados para as séries do NOAA 12 (0,9), em relação os R^2 do NOAA 11 (0,67), também confirmam esta afirmação. Com relação a acurácia, o NOAA 11 apresentou melhores resultados do que o NOAA 12. É interessante notar também que a aplicação dos algoritmos reduzidos implicou numa pequena perda de acurácia, que pode, contudo, ser considerada insignificante

Na validação dos algoritmos, testou-se as equações de TSM derivadas para Aleatório-1 nos dados da série Aleatório-2 e vice-versa. Calculou-se as RMSDs entre T_{DER} e as TSMs obtidas pela aplicação cruzada dos algoritmos (Cruzada), comparando-se o resultado com as RMSDs calculadas anteriormente na própria série (Nativa). Cabe ressaltar que as séries Aleatório-1 e Aleatório-2 são independentes entre si, tendo sido escolhidas de forma aleatória e sem repetição a partir da série Total, servindo, portanto, para este propósito. Foram validados os algoritmos regionais derivados (REG) e as equações simples, de correção da TSM calculada pelo algoritmo

global (COR).

Os resultados da validação para os satélites NOAA 11 e NOAA 12 (**Tabelas 9 a 12**) revelam que os algoritmos relativos ao satélite NOAA 11 foram melhor validados do que os do NOAA 12. As equações obtidas para as séries Aleatório 1 e 2 do NOAA 11 são muito similares entre si, não existindo diferenças de acurácia no que diz respeito a validação. Para o NOAA 12, verificou-se diferenças pequenas, inferiores a $0,1^{\circ}\text{C}$, sendo que as equações de correção da TSM global (COR) apresentaram os melhores resultados ($0,05^{\circ}\text{C}$), seguidas do algoritmo regional derivado na série Aleatório-2 ($0,07$).

De uma forma geral, a comparação entre as acurácias (RMSDs) dos diversos algoritmos mostra que as equações de correção da TSM geradas pelo algoritmo global (T_{SAT}), forneceram resultados melhores do que os algoritmos regionais derivados. Além disso, para o NOAA 11, quando comparadas com as temperaturas de campo (T_{DER}), as temperaturas calculadas pelas equações de correção (T_{COR}) possuem correlações mais elevadas do que as temperaturas geradas pelos algoritmos regionais (T_{REG}).

TABELA 9 - VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS NA SÉRIE ALEATÓRIO-1 DO NOAA-11

Algoritmo	RMSD Cruzada	RMSD Nativa	Diferença
Aleatório-2 REG	0,75	0,75	0
Aleatório-2 REG (reduzido)	0,75	0,75	0
Aleatório-2 COR	0,63	0,63	0

TABELA 10 - VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS NA SÉRIE ALEATÓRIO-2 DO NOAA-11

Algoritmo	RMSD Cruzada	RMSD Nativa	Diferença
Aleatório-1 REG	0,81	0,81	0
Aleatório-1 REG (reduzido)	0,82	0,82	0
Aleatório-1 COR	0,74	0,74	0

TABELA 11 - VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS NA SÉRIE ALEATÓRIO-1 DO NOAA-12

Algoritmo	RMSD Cruzada	RMSD Nativa	Diferença
Aleatório-2 REG	0,97	0,9	0,07
Aleatório-2 COR	0,92	0,87	0,05

TABELA 12 - VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS NA SÉRIE ALEATÓRIO-2 DO NOAA-12

Algoritmo	RMSD Cruzada	RMSD Nativa	Diferença
Aleatório-1 REG	0,94	0,85	0,09
Aleatório-1 REG (reduzido)	1,02	---	---
Aleatório-1 COR	0,91	0,86	0,05

Finalmente, realizou-se um teste de significância para a igualdade entre os valores médios da T_{REG} e da T_{COR} calculadas, utilizando-se uma distribuição t de Student e um nível de significância de 5%, determinando-se que não existem, para o conjunto de dados estudado, diferenças significativas entre a utilização de um algoritmo regional ou uma equação simples para a correção de temperatura, para ambos os satélites.

4 Conclusões

De uma forma geral, a validação provou que os algoritmos regionais derivados, constituem uma família de retas muito similares entre si, o que na prática implica numa igualdade entre estes algoritmos. Para as equações de correção, pode-se afirmar o mesmo, considerando-se as retas obtidas nas séries Total, Aleatório 1 e Aleatório-2.

Apesar das equações de correção da TSM (T_{COR}) apresentarem melhores acurácias dos que os algoritmos regionais derivados (T_{REG}), não existe, a um nível de significância de 5%, diferença estatística na aplicação de um ou de outro algoritmo. Assim, sugere-se a aplicação das equações de correção para os dados pretéritos já processados pelo algoritmo global (T_{SAT}), enquanto que para os dados ainda não processados recomenda-se a aplicação dos algoritmos regionais, pois realiza-se apenas 1 passo computacional ao invés de 2 passos.

As acurácias obtidas neste trabalho para a região da costa S-SE brasileira apresentam valores ligeiramente inferiores ($>$ RMSDs) ao valor de acurácia médio esperado para o algoritmo global ($0,7^{\circ}\text{C}$ segundo Barton, 1995). Provavelmente isto se deve ao fato da maioria dos dados utilizados estarem localizados em áreas de significativos gradientes termais de TSM (regiões frontais da CB, com grande presença de meandros e vórtices em várias escalas espaciais).

Os resultados deste trabalho poderão ser utilizados para um acompanhamento da estabilidade dos algoritmos MCSST ao longo do tempo, num monitoramento da TSM de caráter operacional. A verificação contínua das RMSDs entre as temperaturas obtidas por satélite e de campo permite que se avaliem possíveis mudanças das condições atmosféricas, devidas a presença anômala de aerossóis, fumaça etc. Com o início do Programa Nacional de Bóias, no segundo semestre de 1997, estão sendo lançados novos derivadores monitorados pelo sistema Argos de forma operacional. Assim sendo, um conjunto grande de TSMs obtidas por derivador estará disponível para o acompanhamento da estabilidade dos algoritmos.

5 Referências

- Argos System Guide*, Issue 1. Toulouse, France, CLS/Service Argos, Sept. 1989.
- Barbieri, R.W. ; McClain, C.R. ; Endres, D.L. *Methodology for Interpretation of SST Retrievals Using the AVHRR Split Window Algorithm*. Greenbelt, Maryland, Goddard Space Flight Center, NASA, Sept. 1983. (NASA Technical Memorandum 85100).
- Barton, I.J. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status. Journal of Geophysical Research, 100(5): 8777-8790, May. 1995.
- Coll, C. , Caselles, V, Valor, E. Atmospheric Correction and Determination of Sea Surface Temperature in Midlatitudes from NOAA-AVHRR Data. Manuscrito impresso em 1993.
- Kidwell, K.B. ed. *NOAA Polar Orbiter Data*. Washington D.C., Users Guide, Satellite Data Services Division, NOAA, June 1995.
- McClain, E.P.; Pichel, W.G.; Walton, C.C. Comparative performance of AVHRR-based multi-channel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. C6, p. 11587-11601, Nov. 1985.
- Robinson, I.S. *Satellite Oceanography: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. Ellis Horwood, New York 1985. 455p.
- Strong, A.E. ; McClain E.P. Improved ocean surface temperatures from space - comparisons with drifting buoys. *Bulletin American Meteorological Society*, 65(2): 138-142, Feb. 1984.
- Yellow Springs Instrument Company (YSI). *Temperature sensors and probes*. Yellow Springs, CO, 1993. 93p. (YSI T-3).