



INPE
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

TÓPICOS EM OBSERVAÇÃO DA TERRA: CAP-378

Cálculo e validação da temperatura da superfície do mar através de dados do satélite GOES-16

Eduardo Rohde Eras, Rogério da Silva Batista

Professor
Dr. Antônio Miguel V. Monteiro

13 de Setembro de 2018

Abreviaturas

ABI *Advanced Baseline Imager*. 8

ACM *ABI Clear Sky Mask*. 9, 10

CPTEC Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. 8

CSV *Comma-separated values*. 13

DBCP *Data Buoy Cooperation Panel*. 6

DSA Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais. 8

GDAL *Geospatial Data Abstraction Library*. 11

GDAS *GEOSAT Data Archive Service*. 9, 12

GMT *Generic Mapping Tools*. 9, 11, 20

GOES *Geostationary Operational Environmental Satellite*. 7

NASA *National Aeronautics and Space Administration*. 7

NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*. 5, 7, 8

PCDs Plataforma de coletas de dados. 22

PNBOIA Programa Nacional de Boias. 6, 9

RMSE *Root-mean-square deviation*. 20

SST *Sea Surface temperature*. 5, 8, 9, 13

Conteúdo

1	Introdução	5
2	Revisão Bibliográfica	6
2.1	Boias Meteorológicas	6
2.2	GOES	7
3	Metodologia	8
3.1	A equação de Masuda	8
3.2	Quanto à remoção de nuvens	9
3.3	O cálculo do ângulo zenital e o teste de eficácia do algoritmo	9
3.4	Considerações sobre a metodologia utilizada	9
4	Desenvolvimento	10
4.1	Remoção das Nuvens	10
4.2	Limitando a área do mapa para METAREA-V	11
4.3	Angulo Zenital do Satélite	12
4.4	Tratando os dados das boias	13
4.5	Executando ajustes	15
5	Resultados	18
6	Conclusão	22

Resumo

Boias oceânicas são utilizadas para medições dos dados de superfície do oceano por toda costa brasileira assim como imagens de satélites geoestacionário fornecem medidas similares através de imagens termais. Cada uma dessas técnicas oferece vantagens e desvantagens que incluem limitações de abrangência ou interferência nos dados, logo, um algoritmo capaz de comparar os valores medidos por satélite com as medições de superfície fornecidas pelas boias pode extrair as vantagens de cada modelo e contribuir para uma melhora na obtenção de um mapa de temperaturas da superfície oceânica. A implementação dessa ideia gerou uma melhora nos ajustes dos dados de temperatura para área de interesse dos mares do Brasil e puderam gerar um mapa com uma representação visual desses novos dados assim como ajustes na equação utilizada.

palavras-chave: boia, GOES, temperatura oceânica, algoritmo.

1 Introdução

Segundo Kidder [1], desde 1970 a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) produz operacionalmente dados de temperatura da superfície do mar SST, que é objeto de estudo de correlações com uma grande variedade de eventos oceanográficos, meteorológicos e climáticos, como geração e intensificação de furacões e ciclones [2], os fenômenos el nino e la nina [3], entre outros. Assim, ter um produto de SST com boa qualidade é essencial para melhores previsões e monitoramento do ambiente.

Esse trabalho consiste na geração da SST utilizando dados do satélite GOES-16, centrado em -75.2° oeste em longitude e operacional pela NOAA desde dezembro de 2017, este satélite nesta posição cobre toda a América do Sul, Central e parte da América do Norte com resolução espacial nos canais termais de $2km$ no nadir e resolução temporal de 15 minutos, podendo operar a 5 minutos em modo de escaneamento rápido. Ao mesmo serão utilizados dados de boias meteorológicas localizadas na costa brasileira, afim de através de métodos de regressão obter o melhor algoritmo para a costa do Brasil.

2 Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo serão revistos alguns dos conceitos chave para presente pesquisa, de forma resumida e pontual. Foram selecionados somente os temas mais centrais, necessários para ambientação do trabalho.

2.1 Boias Meteorológicas

Boias meteorológicas (ou boias coletoras de dados) são instrumentos que coletam dados meteorológicos e oceânicos, bem como emitem avisos de emergência a vazamentos de produtos químicos, executam procedimentos legais e participam de projetos de engenharia [4]. Essas boias podem ser ancoradas e bem grandes, localizadas mais próximas à costa ou serem bem menores e flutuarem livremente em mar aberto [5].

De acordo com o *Data Buoy Cooperation Panel* (DBCP), independentemente de estarem flutuando ou ancoradas, as boias de dados medem e transmitem automaticamente, de maneira previsível e controlada, a comunicação em tempo real por meio de sistemas de telecomunicações via satélite. Basicamente, temos dois tipos de boias coletoras de dados [6]:

- **Boias flutuantes ou boias de deriva** são, geralmente, acopladas a alguma forma de âncora flutuante. De fácil implantação e relativamente baratas de operar, medem com confiabilidade as condições da atmosfera e da superfície oceânica por uma média de 18 meses. Têm uma longa história de uso na oceanografia, principalmente para a medição de correntes. Muitos tipos de boias flutuantes também são usadas para fins meteorológicos.
- **Boias ancoradas ou boias fixas** tem localização inerte e coletam regularmente observações de diversos sensores atmosféricos e oceanográficos. Coletam variáveis de superfície como vento, temperaturas do mar e do ar, salinidade e pressão atmosférica, assim como temperaturas bem abaixo da superfície do oceano. São geralmente utilizadas para atender às necessidades da previsão do tempo, necessidades de segurança marítima ou para observar padrões climáticos regionais. Boias desse tipo são normalmente plataformas relativamente grandes e caras. Elas podem variar de alguns metros de altura e largura a mais de 12 metros. Eles precisam ser construídos com materiais muito resistentes para evitar problemas com tempestades em alto-mar e a linha que prende a boia no local desejado precisa ser especialmente forte. O projeto também precisa prever vandalismo intencional ou danos acidentais. Muitos projetos diferentes existem para boias fixas dependendo da área do oceano.

No presente trabalho, foram usados os dados do Programa Nacional de Boias (PN-BOIA), que contam atualmente com 20 boias fixas e 297 boias de deriva [7].

2.2 GOES

De acordo com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) [8], o programa *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) é um esforço conjunto da NASA e da NOAA.

Atualmente [9], cinco satélites GOES estão em órbita ¹:

- GOES-13, reserva, em órbita;
- GOES-14, reserva, em órbita;
- GOES-15, ativo como "GOES-oeste" ou "GOES-P";
- GOES-16, ativo como "GOES-leste" ou "GOES-R";
- GOES-17, em testes, chamado de "GOES-S"

De acordo com a NOAA [10], os satélites da família GOES circulam em a Terra em uma órbita geossíncrona, o que significa que eles orbitam o plano equatorial a uma velocidade que coincide com a rotação do nosso planeta, o que os permitem pairar continuamente sobre uma posição na superfície. O plano geossíncrono está a cerca de 35.800km de altitude, o que permite aos satélites uma visão completa da Terra.

Como os satélites GOES ficam acima de um ponto fixo na superfície, eles fornecem uma vigília constante para os "gatilhos" atmosféricos para condições climáticas severas, como tornados, inundações repentinas, tempestades de granizo e furacões. Quando essas condições se desenvolvem, os satélites GOES são capazes de monitorar o desenvolvimento de tempestades e rastrear seus movimentos. Imagens de satélite GOES também são usadas para estimar as chuvas durante as tempestades e furacões para alertas de enchentes, bem como estimativas de acumulações de neve e extensão total da cobertura de neve.

As imagens geradas pelos satélites GOES são divididas em canais. No satélite GOES-16 por exemplo, temos 16 canais de imagem [11], divididos em diferentes espectros variando de $0.47\mu\text{m}$ a $13.3\mu\text{m}$.

¹Curiosidade: O satélite antes de ser lançado recebe uma letra e ao chegar em orbita recebe um número, por exemplo. está em construção o GOES-T, se o lançamento falhar e satélite não chegar a orbitar, não recebe um numero. Por isso não temos um GOES-Q.

3 Metodologia

Os dados utilizados para a geração da SST são principalmente o canal 14 (11.2 microns) e o canal 15 (12.3 microns) do satélite geostacionário GOES-16 entre o período de 01 de Janeiro de 2018 a 31 de Julho de 2018. Este satélite é o primeiro da nova geração de satélites geostacionários da NOAA, lançado em 19 de Novembro de 2016 e declarado operacional em 18 de Dezembro de 2017. Possui uma gama de instrumentos e sensores, alguns deles operando pela primeira vez no espaço, sendo o principal denominado de *Advanced Baseline Imager* (ABI) capaz de observar a terra em 16 diferentes bandas espectrais sendo 2 no espectro do visível, 4 no infra vermelho próximo e 10 canais infra-vermelhos [12] [13].

O algoritmo utilizado neste trabalho foi originalmente proposto por Sobrino & Román [14], sendo versátil para ser utilizado em toda a superfície da Terra, e posteriormente utilizando valores de emissividade propostos em um estudo realizado por Masuda et al. [15], foi adaptado para poder ser aplicado no oceano [16] [12] [13].

3.1 A equação de Masuda

Consideremos a equação 3.1, proposta por Masuda et al.:

$$SST = T14 + (0.99 * \cos(\text{zen}) + 0.21) * (T14 - T15) + \left(\frac{0.364}{\cos(\text{zen})} + 0.15\right) * (T14 - T15)^2 + \left(\frac{0.327}{\cos^2(\text{zen})} + 0.11\right) \quad (3.1)$$

onde:

- SST é a estimativa da temperatura da superfície do mar em Kelvin;
- $T14$ é a temperatura de brilho no canal 14(11.2 μm) em Kelvin;
- $T15$ é a temperatura de brilho no canal 10(12.3 μm) em Kelvin;
- zen é o ângulo zenital do satélite.

Os dados do ABI em formato netCDF-4 [17] e projeção geostacionária [18], foram adquiridos na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), também disponibilizados on-line pela NOAA [19].

3.2 Quanto à remoção de nuvens

Ao aplicar a equação sobre os canais termais, o algoritmo não faz distinção do que é nuvem e o que é superfície, portanto para obter um dado válido de SST é preciso antes de aplicar a equação remover dos canais termais das áreas afetadas por nuvens, para isso foi utilizado um produto, denominado *ABI Clear Sky Mask* (ACM) [20], onde os pixels representam duas classes:

1. Céu claro / Possível céu claro
2. Nuvem / Possível nuvem

3.3 O cálculo do ângulo zenital e o teste de eficácia do algoritmo

Tendo essas informações, o ângulo zenital do satélite para o ponto observado pôde ser calculado utilizando as equações fornecidas pelas *GEOSAT Data Archive Service* (GDAS) [21] e Dark Target Aerosol Retrieval Algorithm [22].

Para obter uma métrica da eficácia do algoritmo foram utilizados medições de boias meteorológicas fixas e de deriva do PNBOIA que opera em áreas oceânicas de interesse do Brasil. No período avaliado foram obtidos 8718 medições válidas [7] [23].

3.4 Considerações sobre a metodologia utilizada

Para o presente desenvolvimento, foram utilizadas as ferramentas computacionais *tcsh*, *fortran90*, *gdal*, *Generic Mapping Tools* (GMT) e a linguagem de *R*. Todos os dados utilizados são públicos assim como todas as ferramentas utilizadas são *open source*.

A área geográfica de estudo é denominada METAREA-V [24] vista na Figura 3.1, que consiste em uma área marítima reconhecida internacionalmente ao qual o Brasil é responsável por elaborar e disseminar previsões meteorológicas e alertas de mau tempo [25].

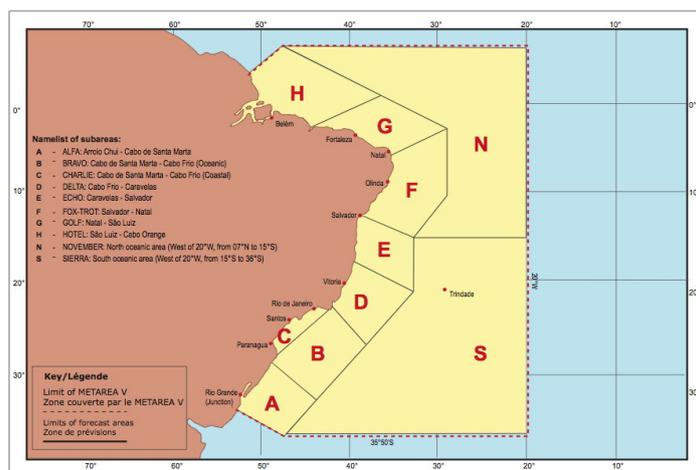


Figura 3.1: METAREA V [24]

4 Desenvolvimento

Nesse capítulo será mostrado como cada etapa do processo foi realizada de forma a se obter um experimento reproduzível.

4.1 Remoção das Nuvens

A primeira operação realizada foi remoção das áreas afetadas por nuvens nos canais termais, o produto ACM utilizado também é proveniente do mesmo satélite GOES-16 sendo assim as características dos dois produtos, como resolução e limites geográficos, iguais. Portanto, para o calculo não foi necessário remapear nenhum dos dois produtos: no ACM os pixels correspondentes a nuvem tem o valor 0 e céu claro 1. Assim, ao multiplica-lo pelos canais termais, os pixels correspondentes a nuvem passam a ser 0 e os demais correspondentes a superfície se mantêm.

O arquivo ACM adquirido possui duas camadas, sendo uma o produto e a outra uma coleção de *flags* de qualidade que define um nível de confiabilidade para cada pixel, essa camada não foi utilizada, sendo optado por realizar o controle de qualidade no produto final.

O trecho de código abaixo utiliza o comando *ncdump* para retirar do *header* as informações úteis na construção da variável PROJ que representa a projeção do arquivo original:

```
set PERSPECTIVE_HEIGHT =
  'ncdump -h ${DIRCLM}/${ARQCLM} |
  grep perspective_point_height |
  awk -F"=" '{print $2}' |
  awk '{print $1}'

set SEMI_MAJOR_AXIS =
  'ncdump -h ${DIRCLM}/${ARQCLM} |
  grep semi_major_axis |
  awk -F"=" '{print $2}' |
  awk '{print $1}'

set LONGITUDE_ORIGIN =
  'ncdump -h ${DIRCLM}/${ARQCLM} |
  grep longitude_of_projection_origin |
  awk -F"=" '{print $2}' |
  awk '{print $1}'

set SWEEP_ANGLE = 'ncdump -h ${DIRCLM}/${ARQCLM} |
  grep sweep_angle_axis |
```

```
awk -F=" " '{print $2}' |
awk '{print $1}'
```

```
set PROJ =
"+proj=geos
+h=${PERSPECTIVE_HEIGHT}
+a=${SEMI_MAJOR_AXIS}
+b=${SEMI_MINOR_AXIS}
+lon_0=${LONGITUDE_ORIGIN}
+x_0=0
+y_0=0
+ellps=GRS80
+units=m
+no_defs
+sweep=${SWEEP_ANGLE}"
```

Utilizando a ferramenta *gdal_translate* do pacote *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL), foi extraído do arquivo original apenas a camada de interesse. Esse comando recebeu por parâmetro a projeção definida acima assim como a extensão, o valor de dado inválido, o formato do arquivo de saída, o arquivo de entrada separado com o delimitador ":" , formato, nome do arquivo de entrada e camada, e por fim o nome do arquivo de saída que irá receber a camada desejada.

```
gdal_translate \
-a_srs "${PROJ}" \
-a_ullr ${EXTENT} \
-a_nodata "${NODATA}"
-of netCDF
HDF5:${DIRCLM}/${ARQCLM}://${LAYER} ${DIRTMP}/${ARQCLM}
```

Em seguida com o GMT, utilizando o comando *grdmath* esse arquivo foi multiplicado pelos canais termais para filtrar os pixels com nuvens:

```
gmt grdmath ${DIRTMP}/${ARQCLM} ${DIRCH14}/${ARQCH14} MUL =
${DIRTMP}/${ARQCH14}
```

4.2 Limitando a área do mapa para METAREA-V

Para extração da área de interesse METAREA-V foram definidos os limites através da ferramenta *gdalwarp* sobre os arquivos correspondentes aos dois canais termais utilizados, reprojando e interpolando para uma grade regular:

```

set LATI = -46
set LATF = 9
set LONI = -69
set LONF = -18

gdalwarp
  -s_srs "${PROJ}"
  -te ${LONI} ${LATI} ${LONF} ${LATF}
  -t_srs
    "+proj=latlong +datum=WGS84" NETCDF:${DIRTMP}/${ARQNAV}:z
  -of netCDF ${DIRTMP}/${ARQRET}

```

4.3 Angulo Zenital do Satélite

A Equação utilizada neste trabalho (Equação 3.1) possui a variável do angulo zenital do satélite, esse angulo é calculado em função do ponto de grade e da posição do satélite. Como durante todo o período da pesquisa os valores foram os mesmos, essa grade foi calculada uma única vez e utilizada para cada iteração. Esse cálculo foi realizado com um programa feito em *fortran90* que basicamente implementa a equação fornecida em GDAS.

```

REAL, PARAMETER :: a=6378140.0, f=.00335281, b=6356750.0, HS=35786000.0
REAL, PARAMETER :: rad=0.017453293, H=0

```

```

xlat = yori - ( i - 1 ) * resy
xlon = xori + ( j - 1 ) * resx

```

```

ylat = xlat*rad
ylon = xlon*rad

```

```

N = a**2/SQRT(a**2*((1+COS(2*ylat))/2)+b**2*(1-((1+COS(2*ylat))/2)))

```

```

xp = (N+H)*COS(ylat)*COS(ylon)
yp = (N+H)*COS(ylat)*SIN(ylon)
zp = ((b**2/a**2)*N+H)*SIN(ylat)

```

```

nx = xp/a**2
ny = yp/a**2
nz = zp/b**2

```

```

xd = -75*rad-xp
yd = 0*rad-yp
zd = HS-zp

```

```

cosz = (xd*nx+yd*ny+zd*nz)/(SQRT(xd**2+yd**2+zd**2)*SQRT(nx**2+ny**2+nz**2))
az(j,i) = ACOS(cosz)

```

O programa acima gera um arquivo binário que para ser melhor manipulado foi georeferenciado e convertida para o mesmo formato, região e dimensão dos canais termais:

```
gmt xyz2grd ${DIRTMP}/${ARQRAW}_zen.bin
-ZTLf -G${DIRTMP}/zen_${YYYYMMDDHHMN}_GMT.nc
-R${DIR}/${ARQKLV}
-di0.0 -V
gmt grdsample ${DIRTMP}/zen_${YYYYMMDDHHMN}_GMT.nc
-R${DIR}/${ARQKLV}
-G${DIRZEN}/zen_${YYYYMMDDHHMN}_ret.nc
```

4.4 Tratando os dados das boias

As boias meteorológicas são instrumentos localizados em área marítima e equipados com sensores capazes de coletar diversas informações como pressão, velocidade e direção do vento, temperatura do ar e da água, salinidade da água, entre outros em uma determinada coordenada geográfica. Algumas são ancoradas em um ponto fixo e outras ficam a deriva coletando informações em coordenadas aleatórias. Para estimar a qualidade do nosso algoritmo foi inicialmente solicitado à marinha os dados de todas as boias que operaram em 2018, porém cada arquivo do tipo *Comma-separated values* (CSV) adquirido continha informações de todo histórico de funcionamento da boia e as medições de todos os sensores. Para cumprir nosso objetivo de aferir e aperfeiçoar a qualidade da SST gerada, esses dados foram filtrados restando apenas o que era de interesse, no caso, latitude, longitude, data e hora e SST medida para o período de interesse:

```
foreach ARQTXT ( `ls ${RAW}/*.*csv` )
  set ARQTXT = `basename ${ARQTXT}`

  set COL = 1
  foreach HEADER ( `head -1 ${RAW}/${ARQTXT} | sed "s/,/ /g" | tr -d "#"` )

    if ( ${HEADER} == "Lat" ||
        ${HEADER} == "Lon" ||
        ${HEADER} == "Year" ||
        ${HEADER} == "Month" ||
        ${HEADER} == "Day" ||
        ${HEADER} == "Hour" ||
        ${HEADER} == "Wtmp" ) then

      cat ${RAW}/${ARQTXT} | awk -F",
        " '{print $'${COL}'}' > ${TMP}/${HEADER}.txt
    endif

    @ COL++
```

```

end

set NLIN = 'cat ${TMP}/Lat.txt | wc -l'
@ NLIN--

seq 0 ${NLIN} > ${TMP}/id.txt

paste ${TMP}/id.txt
      ${TMP}/Lat.txt
      ${TMP}/Lon.txt
      ${TMP}/Year.txt
      ${TMP}/Month.txt
      ${TMP}/Day.txt
      ${TMP}/Hour.txt
      ${TMP}/Wtmp.txt > ${TMP}/${ARQTXT}

tail -${NLIN} ${TMP}/${ARQTXT} | grep -v '\-999' |
  awk '{printf "%05g %5.3f %5.3f %4g-%02g-%02g %02g:00 %5.3f \n",
    $1, $2, $3, $4, $5, $6, $7, $8}' > ${OUT}/${ARQTXT}

end

grep "2018-" ${OUT}/*.csv > ${ARQBOIAS}

```

Tendo essas coleções de dados de satélite e de boias, foi realizado um trabalho de relacioná-las na área de interesse em uma única tabela. Para isso, cada coordenada geográfica do dado de boia foi verificado com a ferramenta *gdallocationinfo* quanto a existência de um dado de satélite para a mesma coordenada. Uma vez que ambos os dados existam para o mesmo horário, essas informações são separadas juntamente com a média dos 8 pixels ao redor do pixel medido pelo satélite, somado a ele próprio para remoção de possíveis ruídos.

```

while ( ${NREG} > 0 )

  set REG = 'cat ${TMP}/boias_${YYYYMMDDHHMN} | tail -${NREG} | head -1'

  set LAT = 'echo "${REG}" | awk '{print $1}''
  set LON = 'echo "${REG}" | awk '{print $2}''
  set BOIA = 'echo "${REG}" | awk '{print $5}''

  set CH14 = 'gdallocationinfo NETCDF:"${ARQCH14}":z
    -geoloc ${LON} ${LAT} | grep "Value" | awk -F":" '{print $2}''

  set CH15 = 'gdallocationinfo NETCDF:"${ARQCH15}":z
    -geoloc ${LON} ${LAT} | grep "Value" | awk -F":" '{print $2}''

  set ZEN = 'gdallocationinfo NETCDF:"${ARQZEN}":z
    -geoloc ${LON} ${LAT} | grep "Value" | awk -F":" '{print $2}''

```

```

if ( ${CH14} != "" && ${CH15} != "" && ${ZEN} != "" ) then
  echo "${LAT},${LON},${BOIA},${CH14},${CH15},${ZEN}" >> ${TMP}/tabela.csv
endif

```

```
@ NREG--
```

```
end
```

4.5 Executando ajustes

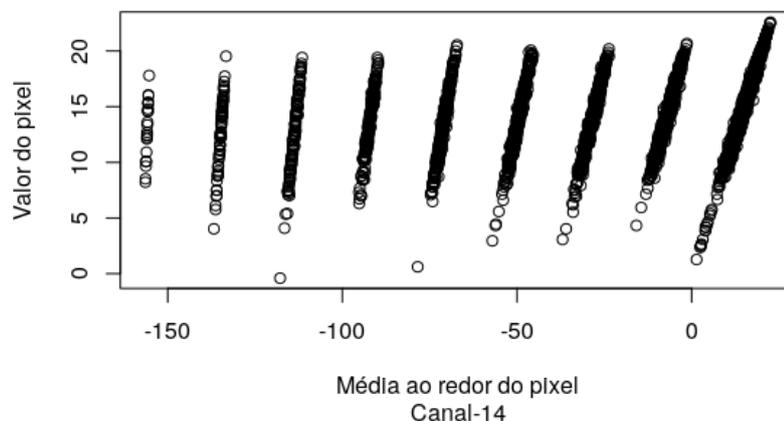
Do processamento acima foram levantados 8649 observações, esse total foi carregado no software *R* e com ele foi gerado um gráfico das diferenças entre temperatura do pixel e média ao redor do pixel:

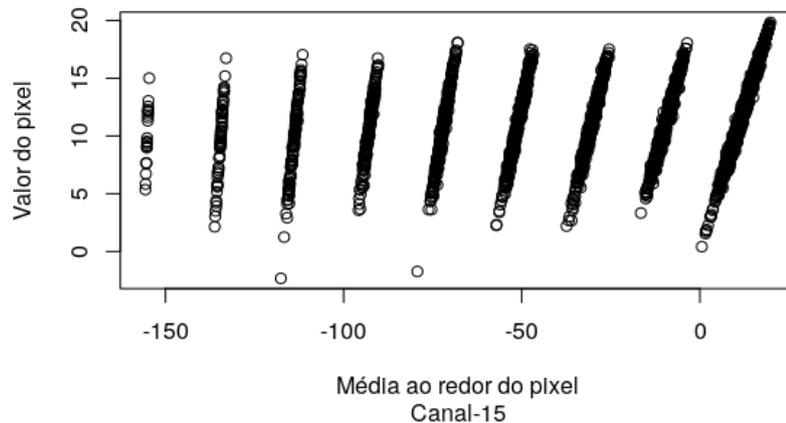
```
tabela <- read.csv(file="tabela.csv", header=TRUE, sep=",")
```

```
plot(tabela$media14-273.15,
     tabela$ch14-273.15,
     ylab="Valor do pixel",
     xlab="Média ao redor do pixel",
     sub="Canal-14")
```

```
plot(tabela$media15-273.15,
     tabela$ch15-273.15,
     ylab="Valor do pixel",
     xlab="Média ao redor do pixel",
     sub="Canal-15")
```

Os gráficos apresentaram o seguinte resultado:



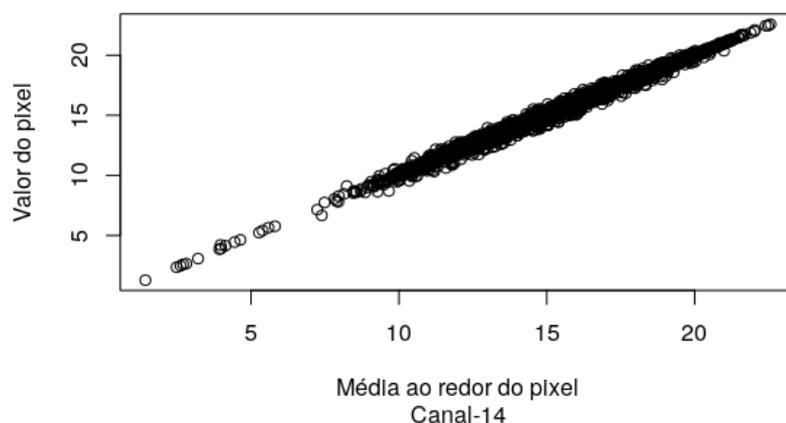


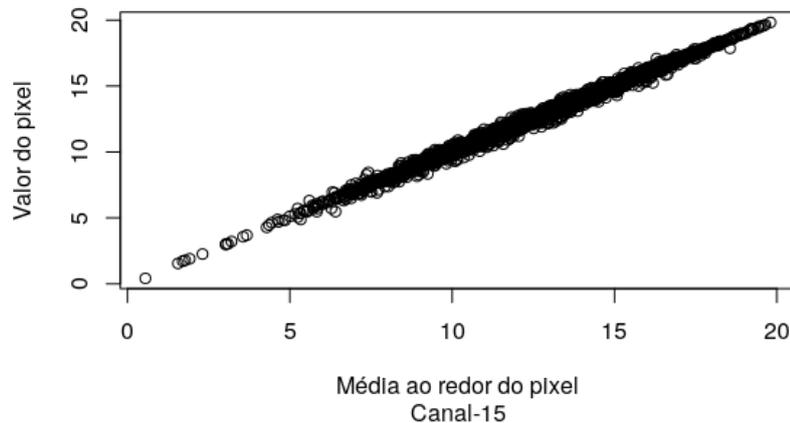
No eixo da média observamos muitos valores abaixo de 0°C , o que é incomum para a superfície da área de estudo, contudo são valores típicos de nuvens, o que significa que o valor do pixel pode estar comprometido. Baseado nisso, foi feita uma eliminação das observações com diferenças entre pixel e média maior que 1°C para mais ou para menos. Para este cálculo foi utilizado os comandos abaixo:

```
tabela$dif_ch14 <- (tabela$media14-273.15)-(tabela$ch14-273.15)
tabela <- subset(tabela, (tabela$dif_ch14>=-1 & tabela$dif_ch14<=1))
```

```
tabela$dif_ch15 <- (tabela$media15-273.15)-(tabela$ch15-273.15)
tabela <- subset(tabela, (tabela$dif_ch15>=-2 & tabela$dif_ch15<=2))
```

Após a eliminação dos valores indesejados o gráfico foi novamente plotado e o resultado aparente é uma tendência, o que leva a entender que o valor do pixel está compatível com os vizinhos. Além disso os valores menores que zero foram eliminados reforçando a análise anterior.





No processo acima foram eliminados 2753 observações, restando um total de 5892 observações que foram separados em dois blocos aleatórios, um com 70%, ou 4124 observações, utilizadas na regressão do algoritmo para treinamento, e outro com os 30% restantes, ou 1768 observações, para o teste de eficiência.

```
ordena <- sort(sample(nrow(tabela), nrow(tabela)*.7))
treinamento<-tabela[ordena,]
validacao<-tabela[-ordena,]
```

Na sequencia foi realizada uma regressão linear múltipla, baseada no método dos mínimos quadrados, na tabela de treinamento. Para isso a fórmula inicial foi dividida em quatro variáveis:

```
sst_boia_klv <- tabela$sst_boia+273.15

var1 <- tabela$ch14
var2 <- (0.99*cos(tabela$sat_zen*0.0174532925)+0.21)*(tabela$ch14-tabela$ch15)
var3 <- (0.364/cos(tabela$sat_zen*0.0174532925)+0.15)*(tabela$ch14-tabela$ch15)^2
var4 <- (0.327/((1+cos(2*tabela$sat_zen*0.0174532925))/2)+0.11)

modelo <- lm(sst_boia_klv ~ var1 + var2 + var3 + var4, data=treinamento)
```

5 Resultados

O modelo de regressão apresentou os seguintes resultados ao executar o comando `summary(modelo)`:

Call:

```
lm(formula = sst_boia_klv ~ var1 + var2 + var3 + var4)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.4915	-0.7071	-0.0340	0.6291	7.2090

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.685e+03	3.590e+02	21.409	<2e-16 ***
var1	6.255e-01	7.441e-03	84.056	<2e-16 ***
var2	-1.854e+00	1.927e-01	-9.623	<2e-16 ***
var3	1.447e+00	7.589e-02	19.063	<2e-16 ***
var4	-1.730e+04	8.180e+02	-21.154	<2e-16 ***

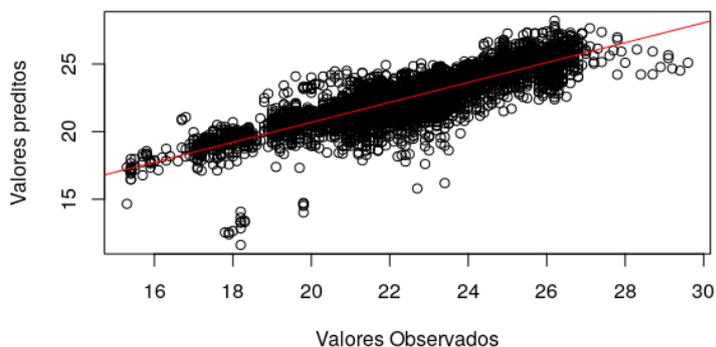
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.164 on 5886 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.7368, Adjusted R-squared: 0.7367

F-statistic: 4120 on 4 and 5886 DF, p-value: < 2.2e-16

O valor R^2 resultante da regressão foi 0.7367, que é um resultado bom para uma primeira análise. Para uma segunda análise foi plotado um gráfico comparando os valores observados e os valores medidos.



O plot acima foi gerado com o seguinte comando:

```
plot(
  x=nova_tabela$sst_boia,
  y=nova_tabela$sst_sat,
  xlab="Valores Observados",
  ylab="Valores preditos"
)
abline(lm(nova_tabela$sst_sat~nova_tabela$sst_boia), col="red")
```

No gráfico é possível observar uma quantidade de valores afastados da linha de tendência o que leva a crer ainda se tratar de algum ruído, os mais visíveis variam na faixa dos 18°C, que pode ser um defeito no sensor da boia, ou ainda uma interferência de nuvem que afetou os pixels vizinhos e não foi eliminado no passo anterior, contudo, a grande maioria dos dados seguiram próximos a tendência.

Os fatores após a regressão ficaram sendo $A = 7685.0$, $B = 0.6255$, $C = -1.854$, $D = 1.447$ e $E = -17300.$, todos com alta significância. Com isso a fórmula inicial foi modificada para:

$$SST = A + B * T14 + C * (0.99 * \cos(\text{zen}) + 0.21) * (T14 - T15) + D * \left(\frac{0.364}{\cos(\text{zen})} + 0.15\right) * (T14 - T15)^2 + E * \left(\frac{0.327}{\cos^2(\text{zen})} + 0.11\right) \quad (5.1)$$

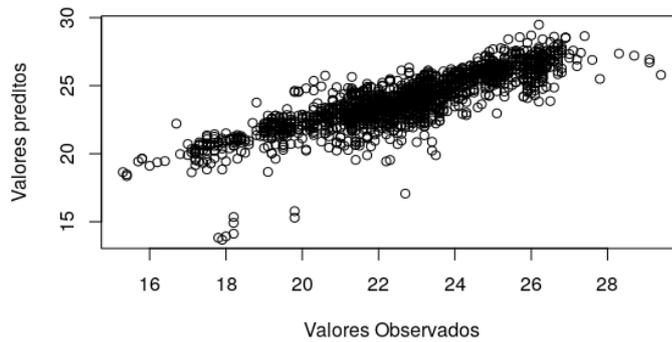
Essa equação foi utilizada na série que foi separada para validação, utilizando os seguintes comandos:

```
A=7685.0
B=0.6255
C=-1.854
D=1.447
E=-17300.0

var1 <- validacao$ch14
var2 <- (0.99*cos(validacao$sat_zen*0.0174532925)+0.21)*
  (validacao$ch14-validacao$ch15)
var3 <- (0.364/cos(validacao$sat_zen*0.0174532925)+0.15)*
  (validacao$ch14-validacao$ch15)^2
var4 <- (0.327/((1+cos(2*validacao$sat_zen*0.0174532925))/2)+0.11)

teste = A+B*var1+C*var2+D*var3+E*var4
```

E o gráfico comparando os dados de validação com os observados foi plotado:



Calculando o erro quadrático médio *Root-mean-square deviation* (RMSE) na coleção de teste, ele passou de 1.960882°C com a equação original para 1.254711°C na equação ajustada. A equação modificada foi inserida no algoritmo para aplicação em toda a grade com uso do GMT:

```
set A = 7685.0
set B = 0.6255
set C = -1.854
set D = 1.447
set E = -17300.0
```

```
gmt grdmath \
  ${A} ${B} ${DIRCH14}/${ARQC14} MUL ADD \
  ${C} 0.99 ${DIRSCR}/${ARQZEN} COSD MUL 0.21 ADD \
  ${DIRCH14}/${ARQC14} ${DIRCH15}/${ARQC15} SUB MUL MUL ADD \
  ${D} 0.364 ${DIRSCR}/${ARQZEN} COSD DIV 0.15 ADD \
  ${DIRCH14}/${ARQC14} ${DIRCH15}/${ARQC15} SUB 2 POW MUL MUL ADD \
  ${E} 0.327 1 2 ${DIRSCR}/${ARQZEN} MUL COSD ADD 2 DIV DIV 0.11 \
  ADD MUL ADD 273.15 SUB = ${DIRTMP}/${ARQOUT}
```

O resultado pode ser observado visualmente. Segue abaixo uma comparação entre o mesmo produto, o primeiro gerado com a equação original e o segundo com a equação modificada, percebe-se que houve uma mudança nos valores de temperatura.

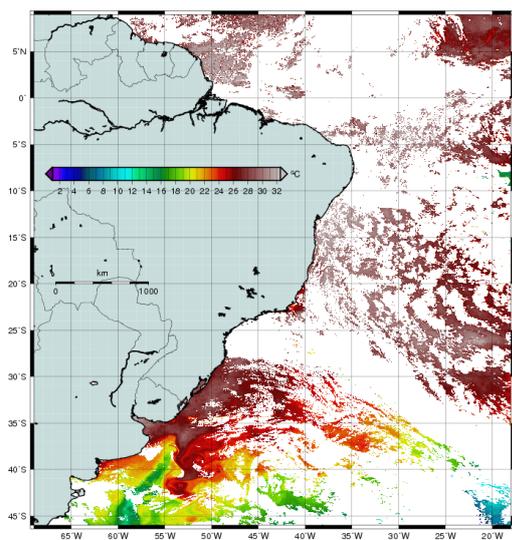


Figura 5.1: Dados originais

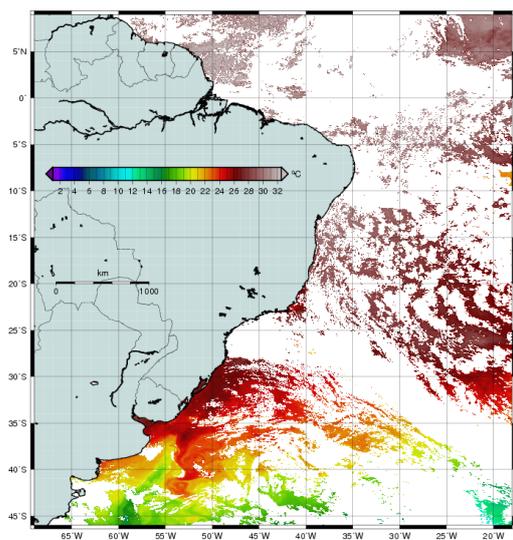


Figura 5.2: Dados ajustados

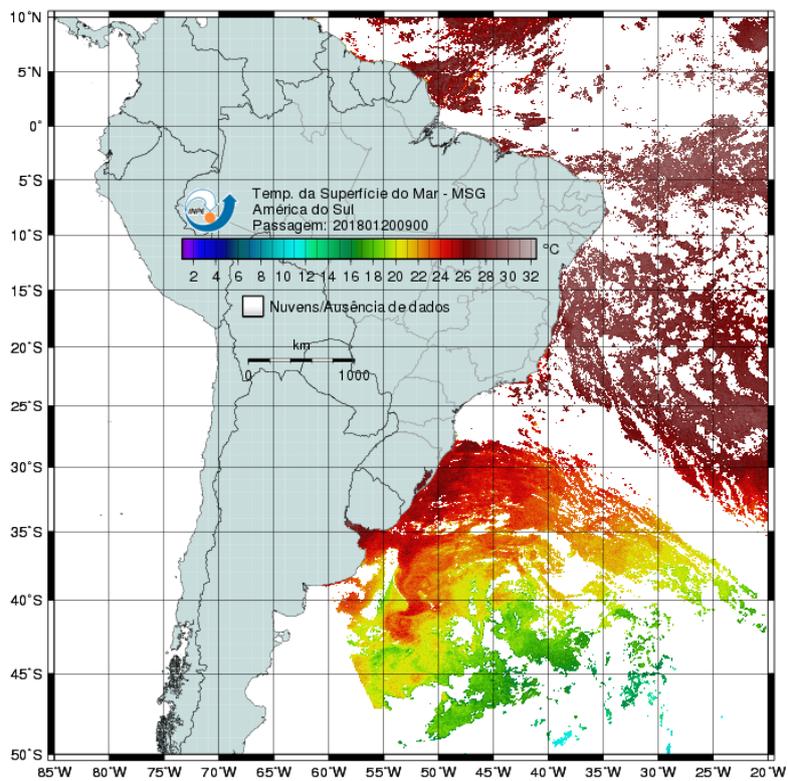


Figura 5.3: Resultado final

6 Conclusão

Este trabalho explorou dois diferentes instrumentos meteorológicos que se complementam, o satélite e as boias meteorológicas. As boias e outros equipamentos como as Plataformas de coletas de dados (PCDs) são equipadas com sensores capazes de aferir com precisão uma determinada variável ambiental, como no nosso caso, a temperatura da superfície oceânica. Mas, como são equipamentos limitados a uma pequena área de abrangência, temos os satélites que, por sua vez, conseguem olhar o globo terrestre em sua amplitude porém suas medições são estimadas e sua qualidade sofre grande influência do ambiente, como posição do sol, ângulo de visada, entre outros. Ao reduzirmos a escala para uma escala regional, reduzimos também essa influência externa e conseguimos ter um produto com mais qualidade. Neste trabalho, conseguimos obter uma melhora na qualidade dos dados, mesmo que pequena, um primeiro passo foi dado. Existem outras componentes que podem ser acrescentadas como medidas de outras bandas espectrais do satélite, outros ângulos, médias climatológicas e assim por diante.

Bibliografia

- [1] Stanley Q Kidder, RUSHWORTH M KIDDER, and Thomas H Vonder Haar. *Satellite meteorology: an introduction*. Gulf Professional Publishing, 1995.
- [2] A Wada and JCL Chan. Relationship between typhoon activity and upper ocean heat content. *Geophysical Research Letters*, 35(17), 2008.
- [3] Xin Li, Chongyin Li, Jian Ling, and Yanke Tan. The relationship between contiguous el niño and la niña revealed by self-organizing maps. *Journal of Climate*, 28(20):8118–8134, 2015.
- [4] Público. Weather buoy. https://en.wikipedia.org/wiki/Weather_buoy. Acessado em Setembro de 2018.
- [5] University of Rhode Island. Weather buoys. <http://www.hurricanescience.org/science/observation/ships/weatherbuoys/>. Copyright © 2010-2015, University of Rhode Island. Acessado em Setembro de 2018.
- [6] DBCP The Data Buoy Cooperation Panel. Data buoy types. <http://www.jcommops.org/dbcp/platforms/types.html>. © Copyright JCOMMOPS 2001-2018. Acessado em Setembro de 2018.
- [7] GOOS Brasil. Programa nacional de boias. <http://www.goosbrasil.org/pnboia/>. © Copyright 2013–2018 GOOS Brasil. Acessado em Setembro de 2018.
- [8] Lynn Jenner and Brian Dunbar. Goes overview and history. <https://www.nasa.gov/content/goes-overview/index.html>. Modificado em 03 de Agosto de 2017, acessado em Setembro de 2018.
- [9] NESDIS. Noaa geostationary satellite programs continuity of weather observations. https://www.nesdis.noaa.gov/sites/default/files/asset/document/GOES_Flyout_Jan_2018_Signed_Linked.pdf. Acessado em Setembro de 2018.
- [10] OSPO. Geostationary operational environmental satellites. <https://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/index.html>. Modificado em 29 de Novembro de 2017, acessado em Setembro de 2018.
- [11] NOAA. Goes-east - latest full disk images. <https://www.star.nesdis.noaa.gov/GOES/FullDisk.php?sat=G16>. Acessado em Setembro de 2018.
- [12] GOES-R Series Program Office. Mission overview. <https://www.goes-r.gov/mission/mission.html>. Acessado em Setembro de 2018.
- [13] GOES-R Series Program Office. Instruments: Advanced baseline imager (abi). <https://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>. Acessado em Setembro de 2018.

- [14] JA Sobrino and M Romaguera. Land surface temperature retrieval from msg1-seviri data. *Remote Sensing of Environment*, 92(2):247–254, 2004.
- [15] K Masuda, T Takashima, and Y Takayama. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. *Remote Sensing of Environment*, 24(2):313–329, 1988.
- [16] M Romaguera, JA Sobrino, and F-S Olesen. Estimation of sea surface temperature from seviri data: algorithm testing and comparison with avhrr products. *International journal of remote sensing*, 27(22):5081–5086, 2006.
- [17] University Corporation for Atmospheric Research UNIDATA. C.1 the netcdf-4 format. https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/netcdf-4/newdocs/netcdf/NetCDF_002d4-Format.html. Acessado em Setembro de 2018.
- [18] PROJ contributors. *PROJ coordinate transformation software library - Geostationary Satellite View*. Open Source Geospatial Foundation, 2018.
- [19] NOAA "National Oceanic and Atmospheric Administration". Comprehensive large array-data stewardship system. <https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome>. Acessado em Setembro de 2018.
- [20] NOAA, NESDIS, and STAR. Clear sky mask. https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/product_cp_clearskymask.php. Modificado em 13 de Junho de 2013, acessado em Setembro de 2018.
- [21] GEOSAT and NIES. Geosat data archive service. https://data2.gosat.nies.go.jp/doc/faq/FAQ_No13_en.pdf. Copyright © National Institute for Environmental Studies. All Rights Reserved. Acessado em Setembro de 2018.
- [22] Robert Levy, Susannah Pearce, and Richard Kleidman. Dark target aerosol retrieval algorithm. <https://darktarget.gsfc.nasa.gov/atbd/aerosol-optics-retrieval-strategy>. Modificado em 20 de Agosto de 2018, acessado em Setembro de 2018.
- [23] Marinha do Brasil. Pnboia - programa nacional de boias. <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia>. Acessado em Setembro de 2018.
- [24] WMO World Meteorological Organization. Ois - operational information service. metarea v. http://www.wmo.int/pages/prog/www/ois/Operational_Information/VolumeD/GMDSS/Metarea5/Metarea5.html. © World Meteorological Organization, 7bis, avenue de la Paix, Case postale No. 2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland. Acessado em Setembro de 2018.
- [25] Marinha do Brasil. Metarea v. https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/imagens_meteorologia/metarea_v.jpg. Acessado em Setembro de 2018.