



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE OCEANOGRAFIA**

IAGO GOMES GRADIN

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA
SUPERFICIAL DA ÁGUA NA BAÍA DE TODOS OS
SANTOS COM DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO.**

Salvador

2017

IAGO GOMES GRADIN

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA
SUPERFICIAL DA ÁGUA NA BAÍA DE TODOS OS
SANTOS COM DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO.**

Monografia apresentada ao curso de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia

Orientador: Prof. Guilherme Camargo Lessa

Salvador

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

IAGO GOMES GRADIN

VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA ÁGUA NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Guilherme Camargo Lessa – Orientador - Ph.D em Ciências Marinhas -
Universidade de Sidney, Austrália. Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

Ruy Kenji Papa de Kikuchi – Ph.D. em Geologia – Instituto de Geociências
UFBA. Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

Carlos Alexandre Domingos Lentini – Ph.D. em Oceanografia – Universidade de
Miami, UM-RSMAS (EUA). Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

Salvador, 27 de Outubro de 2016

AGRADECIMENTOS

Acredito que essa conquista seja pessoal, mas de maneira alguma foi alcançada sozinha. O sentimento que prevalece nesse momento é de gratidão. Agradeço a Deus por ter me dado saúde e discernimento em (quase todas) as minhas escolhas até aqui. Agradeço imensamente a toda a minha família, eles foram/são a base de tudo e, mesmo sem entender direito o que eu fazia, sempre se mostraram orgulhosos de mim. Agradeço em especial aos meus pais, Glaydson e Patricia, por sempre terem apoiado o meu sonho e não terem medido esforços para que eu pudesse realiza-los, amo vocês!

Ao longo desses 6 anos de curso, todos aqueles com quem convivi, sejam apenas colegas e principalmente meus verdadeiros amigos tiveram, de certa forma sua parcela de contribuição para que eu pudesse chegar nesse momento e a todos eles, sou muito grato.

Gostaria de destacar também, a fundamental importância e influência do meu orientador na minha formação, que acreditou em mim desde o começo, incentivando-me e mostrando-me o real sentido e significado de se fazer e porque se fazer Oceanografia. Por fim, gostaria de agradecer também a todos os colegas do Grupo de Oceanografia Tropical (GOAT), que me ajudaram muitas vezes em momentos de desespero e dificuldade nessa área desafiadora que é a oceanografia física.

Para muitos esse é o fim de um ciclo, mas eu encaro como o início de outro, mais desafiador e ainda mais excitante. Mares calmos nunca fizeram bons marinheiros e eu, não pretendo parar por aqui.

RESUMO

A temperatura superficial da água (TSM) é fortemente relacionada com as condições climáticas existentes em determinada região. Estudos pretéritos da TSM na Baía de Todos os Santos (BTS) mostram a existência de um gradiente espacial de temperatura considerável dentro da baía e entre a BTS e a região oceânica vizinha, que varia sazonalmente. Devido à indisponibilidade de uma longa série temporal de TSM, e a restrição espacial dos dados, não se sabe se as amplitudes térmicas e as limitadas tendências interanuais observadas em locais específicos da BTS podem ser generalizadas para toda a baía. O sensoriamento remoto (SR) da TSM já acumula quase duas décadas de registros com resoluções espaciais capazes de individualizar regiões estuarinas. O objetivo deste trabalho é a aplicação do SR na BTS além de descrever a variabilidade espaço-temporal da TSM na BTS e plataforma continental adjacente nos últimos 16 anos e investigar se tendências inter-aneais sugeridas para locais específicos dentro da baía, refletem um comportamento regional. Dois satélites foram utilizados como base de dados, o satélite de alta resolução MODIS-Aqua, e o satélite estacionário GOES. O primeiro mostrou-se de uso limitado devido ao baixíssimo aproveitamento das imagens diárias, o que impede sua utilização para a explicação de fenômenos em escalas anuais, entretanto podem potencialmente ser utilizados para análises sazonais. Já o satélite GOES, de resolução mais grossa, apresentou cobertura quase ininterrupta da região de estudo, fornecendo a mais longa série temporal de TSM para a região até o momento. A variação da TSM média mensal mostrou ser sazonalmente bem definida em toda a região, com um aumento da temperatura durante os meses de verão, e uma diminuição nos meses de inverno. As variações médias mensais de temperatura para a BTS e plataforma adjacente no verão foram 2,5 °C e 2,43 °C e no inverno de 3,1 °C e 2,7 °C, respectivamente. As diferenças de temperatura entre BTS e plataforma nos meses de verão são superiores a 1 °C enquanto que nos meses de inverno a temperatura é quase homogênea em toda a região. A variação máxima anual de temperatura na BTS foi de 7,8 °C e na plataforma de 6,3 °C. Os resultados deste trabalho apontam que há similaridade espacial de tendências de aquecimento e resfriamento para toda a região e a possível existência de um ciclo de aquecimento de 16 anos. A maior intensidade da ressurgência costeira no ano de 2012 fez com que a temperatura média anual da plataforma e BTS fosse a menor dentre os 16 anos de monitoramento. O ano de 2013, coincidentemente o ano mais árido nos últimos 30 anos, apresentou a maior diferença de temperatura média anual entre a BTS e plataforma, de de 1,8 °C,

ABSTRACT

Sea surface temperature (SST) is strongly correlated to the regional climatic conditions. . Previous SST studies in Todos os Santos Bay (BTS) show the existence of a considerable spatial temperature gradient inside the bay and between the bay and the continental shelf, that varies seasonally. Due to the unavailability of long SST temporal series and its spatial restriction, it is not known yet if the thermal amplitudes and limited interannual trends observed at specific regions in the BTS can be generalized across the bay. The remote sensing (RS) of SST has almost two decades of data with spatial resolutions capable of individualizing estuarine regions. The aim of this paper is to apply remote sensing in the bay as well as describe the spatial and temporal variability of the SST in the BTS and the adjacent continental shelf in the last 16 years and investigate if interannual trends suggested for specific regions inside the bay reflects a regional behavior. Data base obtained with two satellites were used. The high resolution satellite MODIS-Aqua, and the geostationary satellite GOES. The first showed limited usage due to the small number of useful daily images, which compromises analyses in annual scales, although it can potentially be used to investigate seasonal analyses. On the other hand, the GOES satellite presented almost uninterrupted coverage at the region of study, providing the longest time series of SST at the region to date. The SST monthly mean variation was clearly seasonally defined within the whole region. Temperature increases during summer time and decreases during winter time. The monthly mean temperature variation at BTS and the continental shelf were respectively 2,5 °C and 2,4 °C in summer and 3,1 °C and 2,7 °C in winter. The temperature difference between BTS and the continental shelf in summer time were higher than 1 °C whereas in winter time it is almost homogenous along the whole region. The annual maximum temperature variation in BTS was 7,8 °C and on the platform 6,3 °C. The results of this work indicate that there is spatial similarity of heating and cooling trends among the region and the possible existence of a 16 years cycle for the region. The higher coastal upwelling intensity in 2012 lead to a decrease in the mean temperature in both regions, being the lowest in the 16 yeas of study. The year of 2013, coincidentally the most arid year in the last 30 years, presented the highest temperature difference of 1,8 °C between BTS and continental shelf.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | OBJETIVO..... | 3 |
| 3 | ÁREA DE ESTUDO..... | 3 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 6 |
| 4.1 | Imagens de satélite (TSM e Chla – Sensor Modis)..... | 6 |
| 4.1.1 | Aquisição de dados..... | 6 |
| 4.1.2 | Processamento de dados..... | 7 |
| 4.1.3 | Aproveitamento de imagens..... | 9 |
| 4.2 | Imagens de satélite (TSM – satélites GOES)..... | 11 |
| 4.2.1 | Processamento de dados..... | 12 |
| 4.3 | DADOS DE VENTO..... | 17 |
| 5 | RESULTADOS..... | 17 |
| 5.1 | Comparação dos dados dos satélites..... | 17 |
| 5.2 | Variação de longo prazo da TSM..... | 20 |
| 5.3 | Variação ANUAL da TSM..... | 22 |
| 5.4 | Variação mensal da TSM..... | 28 |
| 6 | DISCUSSÃO..... | 35 |
| 7 | CONCLUSÃO..... | 41 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 42 |

1 INTRODUÇÃO

A temperatura superficial da água (TSM) influencia diretamente atividades de interesse científico, comercial e social, como modelagem da dinâmica oceânica, previsão do tempo e gestão costeira (Karagali *et al.*, 2012). Estudos demonstram a importância da TSM em vórtices de mesoescala (Churchill *et al.*, 2005), na toxicidade de mariscos (Luerssen *et al.* 2005; Thomas *et al.* 2010), no desenvolvimento de floração de algas (Ryan *et al.* 1999) e na circulação estuarina (Rodrigues, 2016). Além disso, medidas precisas de TSM são importantes para o entendimento das condições climáticas do passado, do presente e do futuro (Kilpatrick *et al.*, 2015). Segundo Rocha (2015), a indisponibilidade de longas séries de dados de temperatura da água dificulta a criação de indicadores indiretos, ou *proxies* de temperatura capazes de fornecer informações sobre o clima pretérito.

Amostragens pontuais de qualquer propriedade hidrográfica apresentam limitações para o entendimento das condições gerais do ambiente, especialmente se atrelado a uma baixa frequência amostral (Reinart e Reinhold, 2008). O sensoriamento remoto (SR), é uma poderosa ferramenta no estudo das condições climáticas atuantes em determinada região. Os dados gerados pelo SR podem complementar programas de monitoramento contínuo “*in situ*”, além de melhorar a confiabilidade dos resultados (Reinart e Reinhold, 2008). No que se refere à TSM, que é influenciada pela precipitação, descarga fluvial, ventos, insolação, e intensa mistura de massas de água, limitações espaço-temporais podem dificultar a detecção de padrões espaciais e tendências de longo prazo. Segundo Kilpatrick *et al.* (2015), o sensoriamento remoto é o melhor método de investigação da TSM em períodos diários a decenais.

A aquisição de dados de TSM por satélites que operam na faixa do visível é baseada em condições de atmosfera relativamente transparente, de modo que a aquisição de informações em áreas cobertas por nuvens é limitada. Em áreas costeiras e estuarinas, devido à presença de aportes continentais e a proximidade com massas de terra, o uso de dados orbitais pode ser comprometido (Ciotti, 2005). No Brasil, a utilização do SR para o estudo de TSM estuarina ainda não foi amplamente realizado, muitas vezes limitando-se ao estudo da TSM em dias que apresentaram condições ideais para a aquisição de dados orbitais (Carvalho e Lentini, 2011) e à comparação de dados coletados *in situ* para os mesmos dias (Barros *et al.*, 2003).

A Baía de Todos os Santos (BTS), é um estuário tropical com área de 1.233 km² onde a variabilidade do campo da TSM ainda não foi exaustivamente investigada. Os dados existentes mostram que existe um gradiente de temperatura que varia sazonalmente ao longo do ano. Utilizando sensoriamento remoto, Carvalho e Lentini (2011), reportaram a variação da TSM para a BTS no ano de 2009. Neste ano, a TSM aumentou de janeiro a abril, tendo suas máximas registradas no mês de março, e diminuiu até atingir as menores temperaturas no mês de agosto. Cirano e Lessa (2007), com base em curtas (15 dias) séries temporais mostram que existem notáveis diferenças nos valores de temperatura da água do mar entre a região interna da BTS e a plataforma continental adjacente. Durante o verão, a temperatura da água dentro da baía é mais elevada que na plataforma, com variações espaciais de temperatura de até 3 °C entre as duas regiões. Durante o inverno, a variação espacial da temperatura entre as duas regiões é reduzida para menos de 1 °C.

O trabalho realizado por Santos (2014), também utilizando o sensoriamento remoto, identificou a existência de anomalias negativas de temperatura na plataforma continental vizinha à BTS durante o verão, classificadas pelo autor como eventos de ressurgência. Estes eventos ocorreram com mais frequência entre os meses de dezembro e março e persistiam por períodos variando de 72 horas a 120 horas. Por fim, o trabalho de Rodrigues (2016), utilizando séries de dados *in situ* (2013 a 2015), investigou a influência de forçantes meteorológicas e oceanográficas na variabilidade da temperatura, porém com limitada abordagem espacial, tendo-se restringido à região interior da baía. Neste estudo, as maiores amplitudes diurnas de oscilação de temperatura na BTS ocorreram no verão, com máximas sendo registradas por volta das 16:00 horas. As maiores variações longitudinais e verticais de temperatura, de 3,4 °C e 5,6 °C respectivamente, também ocorreram no verão. Ainda segundo o autor, a amplitude da oscilação sazonal da temperatura da água na BTS é semelhante a dos ciclos de aquecimento e resfriamento encontrado por Santos (2014) para a plataforma continental adjacente, onde as maiores e menores temperaturas são registradas em março e agosto, respectivamente.

Devido a indisponibilidade de uma longa serie temporal de TSM, não se sabe se as tendências indicadas de variação temporal da temperatura ou a distribuição espacial dos valores médios e sua variância são característicos de um período ou regiões específicas da BTS ou se realmente podem ser considerados como valores espacialmente representativos e indicadores de tendências de mais longo prazo.

2 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo aplicar o sensoriamento remoto na BTS, além de descrever a variabilidade espaço-temporal da TSM na baía e plataforma continental adjacente de modo a estabelecer valores de referência para estudos oceanográficos, e investigar se tendências inter-anuais sugeridas para locais específicos dentro da baía refletem um comportamento regional.

Como objetivos específicos são listados:

- i) Desenvolver um protocolo para a obtenção de dados válidos dentro da BTS utilizando o sensoriamento remoto
- ii) Estudar a distribuição dos valores de temperatura em escalas de tempo mensais e anuais
- iii) Determinar a variação temporal das diferenças espaciais de temperatura.

3 ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Todos os Santos está centrada na latitude $12^{\circ}50'S$ e longitude $38^{\circ}38'W$ (Figura 1), possuindo aproximadamente uma largura (N-S) de 32 km e comprimento (L-W) de 50 km (Cirano e Lessa, 2007). O clima ao redor da baía é tropical úmido, com temperatura anual média de $25,2^{\circ}C$. As maiores temperaturas médias do ar ocorrem em fevereiro e março, com média mensal de $27^{\circ}C$ enquanto as menores são registradas em julho e agosto, onde a média mensal é de $23,8^{\circ}C$ (Rodrigues, 2016). A precipitação média anual em Salvador é de 2.100 mm, com estação chuvosa (médias mensais $>300mm$) ocorrendo entre abril e junho e a estação seca (médias mensais $<150 mm$) entre agosto e maio (INMET, 1992) (Figura 2A). Considerando uma taxa média de precipitação, ponderada por área, o volume de chuva que cai diretamente na baía é de $2,42 \times 10^9 m^3/$ ano. Existe um gradiente de precipitação de 15 mm/km em sentido à extremidade oeste da baía, entre Salvador e o Rio Paraguaçu, onde a precipitação média anual é de 1200 mm (Cirano e Lessa, 2007).

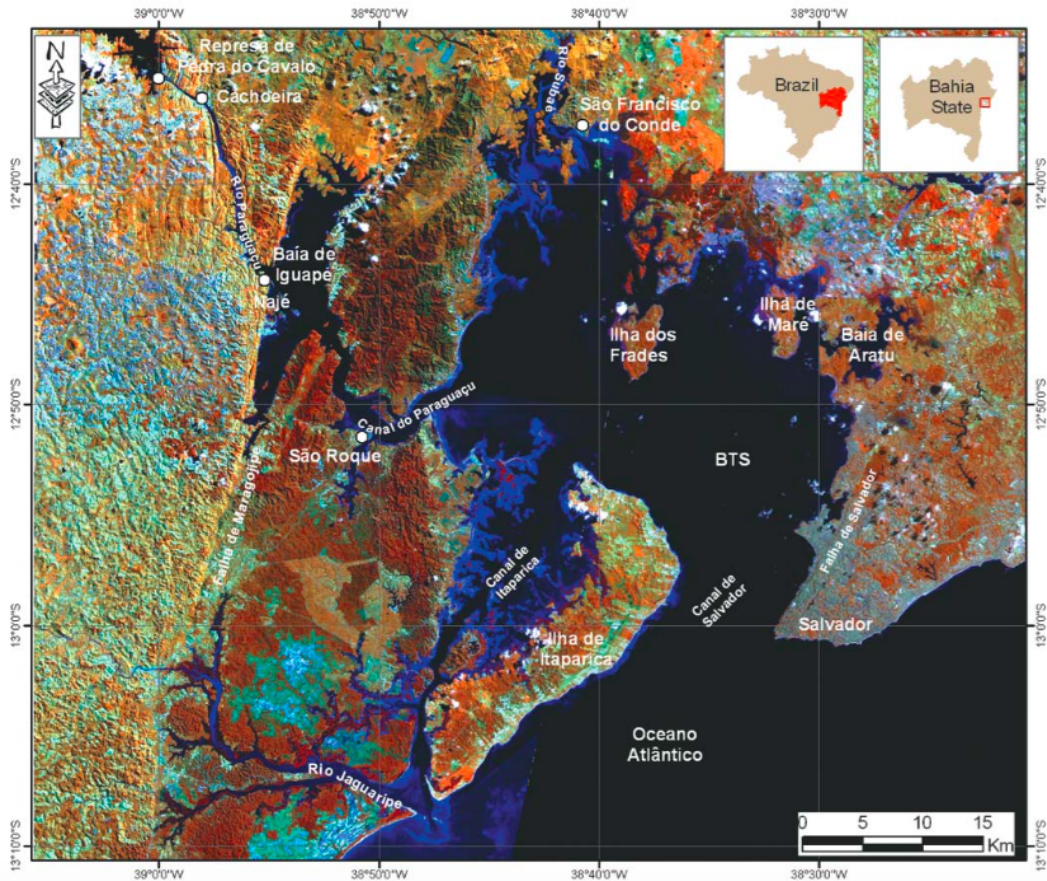


Figura 1 - Imagem de satélite de Baía de Todos os Santos (BTS), juntamente com a localização de feições geológicas importantes e canais de drenagem. Figura extraída de Cirano e Lessa (2007).

A exposição à insolação também varia ao longo do ano. Segundo Rodrigues (2016), o verão e a primavera são as estações que apresentam as maiores horas de insolação, ocorrendo um máximo em janeiro (235 horas). O outono e o inverno correspondem ao período de menos horas de insolação, com mínimo ocorrendo em junho (~140 horas) (Figura 2B).

Segundo Lessa *et al* (2009), a coluna d'água da BTS é bem misturada, e possui um pequeno gradiente vertical de densidade devido à diminuta contribuição da descarga fluvial quando comparada com o seu volume total, que alcança aproximadamente $12 \times 10^9 \text{ m}^3$ durante maré de sizígia (Cirano e Lessa, 2007). A bacia do rio Paraguaçu é a maior área de drenagem ($56,000 \text{ km}^2$), sendo o rio o responsável pela maior descarga de água doce para a baía, com uma vazão média anual $52,79 \text{ m}^3/\text{s}$. O rio Jaguaripe e o rio Subaé, outros dois importantes rios (Figura 1), tem vazão média de apenas $14,94 \text{ m}^3/\text{s}$ e $4,48 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente (Lima & Lessa 2001). Dois canais conectam a BTS

com a plataforma, canais de Salvador (a leste) e de Itaparica (a oeste), separados pela ilha de Itaparica). O canal de Salvador, com uma profundidade média de 25 m, é o principal responsável pela troca de massas d'água entre a baía e o oceano (Lessa et al., 2001, Cirano & Lessa 2007). Já o canal de Itaparica, com cerca de 10 m de profundidade (Carvalho e Lentini, 2011) tem influência limitada na circulação. A plataforma continental nas imediações de Salvador é a mais estreita do Atlântico Sul ocidental, apresentando uma largura mínima de apenas 8 km (Knoppers *et al.*, 1999) (Figura 3).

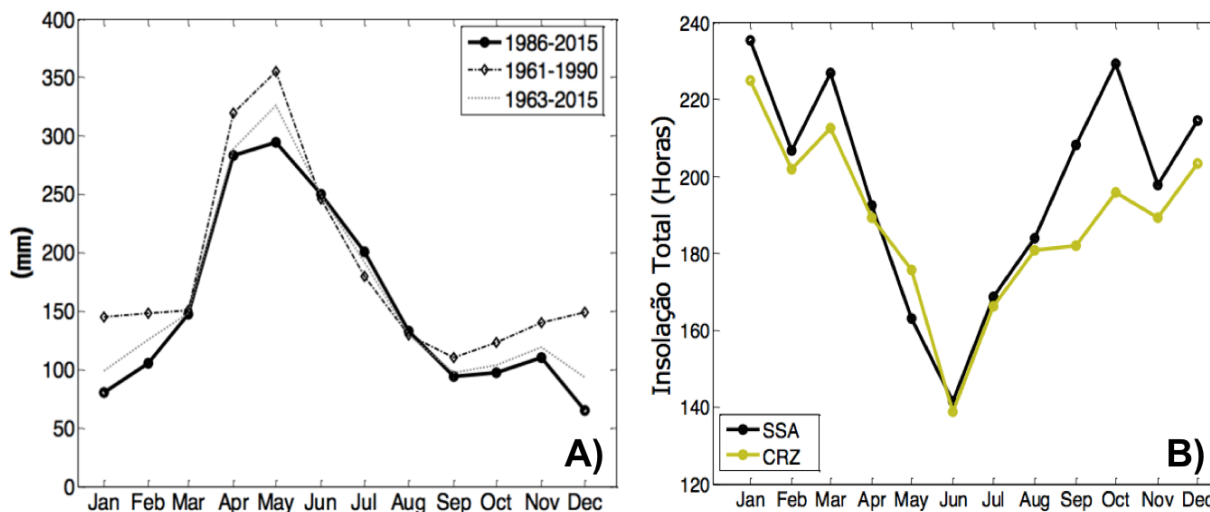


Figura 2 - A) Normais climatológicas de precipitação acumulada mensal para Salvador e B) Normal climatológica do total de insolação mensal para Salvador (SSA) e Cruz das Almas (CRZ). Figuras extraídas de Rodrigues (2016).

As correntes dentro da BTS são claramente controladas pela maré, que tem característica semi-diurna com número de forma variando de 0,06 em regiões dentro da baía a 0,11 na região oceânica adjacente (Cirano e Lessa 2007). A excursão da maré na entrada na BTS é da ordem de 10 km em sizígia (Lessa et al 2009). Cirano e Lessa (2007) reportaram a ocorrência de duas distintas massas d'águas na BTS. A Água Tropical (AT), com temperatura acima de 20 °C e salinidade superior a 36 psu, ocupa a BTS nos meses de verão, enquanto que a Água Costeira (AC), mais fria quando comparada a AT, porém com temperatura também superior a 20 °C e salinidade menor que 36 psu, se origina na BTS nos meses de inverno e mantém a AT na plataforma. Segundo Lessa *et al* (2017), o tempo de residência aumenta para dentro da baía, podendo atingir 150 dias nas regiões mais interiorizadas.

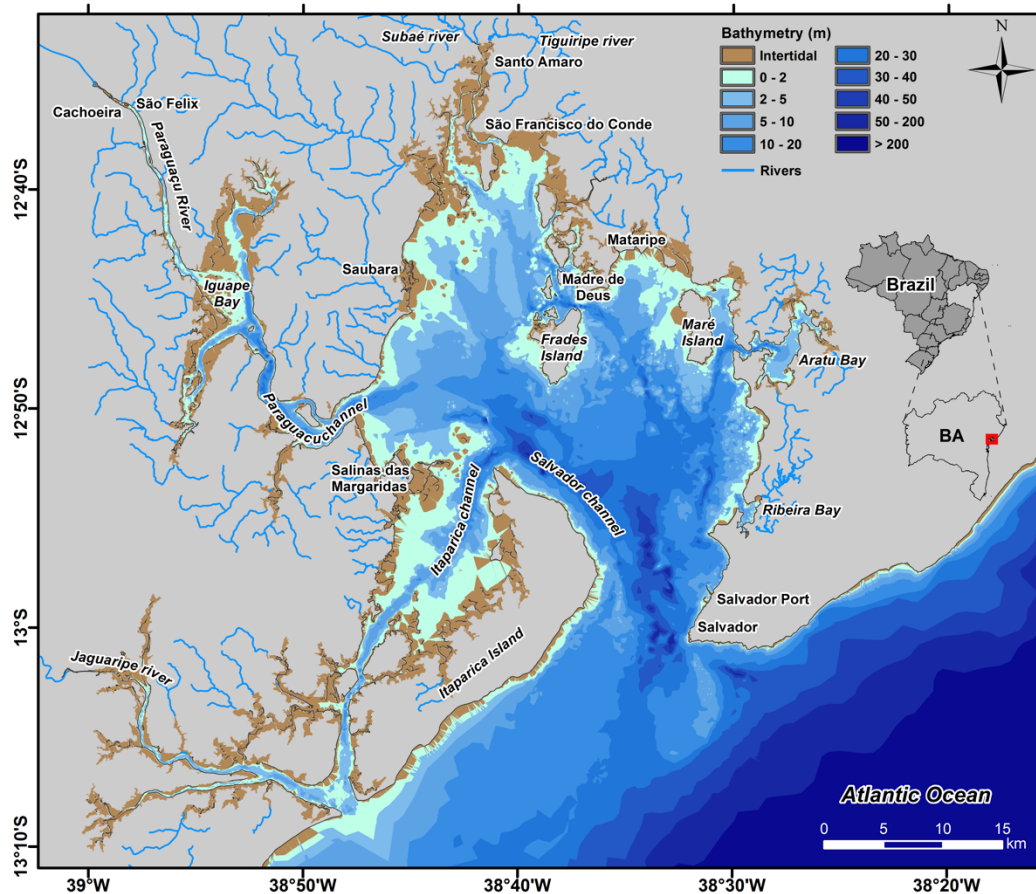


Figura 3 - Batimetria da BTS e da plataforma continental adjacente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 IMAGENS DE SATÉLITE (TSM E CHLA – SENSOR MODIS)

4.1.1 Aquisição de dados

Os dados de temperatura superficial do mar e clorofila foram obtidos através do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*), a bordo do satélite Aqua da NASA (National Aeronautics and Space Administration).

O sensor MODIS adquire dados em 36 bandas espectrais de 0,415 a 12,235 μm com resolução espacial entre 250 m a 1 km (Savtchenko et al., 2004). Possui uma varredura de 55° para cada lado da órbita de 705 km de altura resultando em uma faixa imageada de 2.330 km, com cobertura global em 2 dias.

O produto MODIS/Aqua, MYD01 – *Raw Radiances in Counts*, disponibilizado pela NASA, corresponde a uma imagem do nível 1A (L1A), a qual é formada por todos os dados do sensor MODIS em números digitais de radiância bruta para todas as bandas.

Imagens diárias MODIS-Aqua level 1A (Scans of raw radiance in counts) de 2003 a 2016 foram obtidas gratuitamente através do site da NASA (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>). Para a região da BTS, o sensor MODIS disponibiliza imagens em dois períodos, um diurno e um noturno. Para este trabalho, foram utilizados os produtos diários, que são obtidas por volta das 16:00 hs. As imagens foram pré-visualizadas por meio de miniaturas para a exclusão de imagens que foram significativamente afetadas por nuvens, reflexão solar, ou muito próximas as bordas da imagem (Figura 4).

4.1.2 Processamento de dados.

O processamento foi dividido em duas partes. Primeiramente houve o processamento das imagens através do método descrito por OBPG (2007) no software SeaDAS 7,3 (SeaWiFS Data Analysis System) disponível no site da NASA (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>). Posteriormente, os dados foram processados em MATLAB para a eliminação de valores espúrios.

Imagens diárias (L1A)

- i) Georreferenciamento do arquivo - O primeiro passo do processamento foi a criação de um arquivo (modis.GEO) a partir da imagem L1A. O *Seadas* faz a calibração e geolocalização das radiâncias em projeção cilíndrica e ainda adquire, via internet, os arquivos de georreferenciamento contendo as coordenadas geodésicas de cada pixel, dados de elevação do terreno e os ângulos solar zenital e azimutal do satélite (Gordon & Wang, 1994)
- ii) Geração de arquivo L1B - O segundo passo é a criação de um arquivo L1B utilizando como entrada a imagem L1A e o arquivo (modis.GEO). Nesta etapa há a aplicação de correção atmosférica padrão aos dados, similar ao modelo aplicado à correção de dados SeaWiFS, que utiliza as bandas do infravermelho próximo para calcular a reflectância dos aerossóis em cada pixel da imagem (Gordon & Wang, 1994).

- iii) Geração de arquivo L2 - Utilizando o arquivo L1B criado como entrada, o *Seadas* processa e a TSM é criada a partir do algoritmo global MOD28 (Brown *et al.*, 1999).
- iv) Delimitação da área de estudo – Utilizando como limites as latitudes -12,4 °S / 13.4 °S e limites longitudinais -39,5 °W / -38 ° W, foi feito um recorte para a região de interesse.
- v) Exportação em arquivo NetCDF-BEAM – As variáveis geofísicas (TSM e *Chla*) e as coordenadas geográficas dos pixels foram exportadas em um único arquivo, em formato NetCDF-BEAM, para o seguimento do processamento no software MATLAB.
- vi) Eliminação dos dados espúrios de temperatura – Esse processamento foi feito no software MATLAB e dividido em duas partes. Na primeira etapa, para excluir os dados espúrios de TSM, considerou-se apenas os pixels encontrados nos dados de *Chla* diferentes de zero, pois devido a nuvens espessas, os valores de clorofila nestas imagens são nulos.
- vii) Após este último processamento, verificou-se que nas bordas das nuvens ainda haviam valores de temperatura menores, então, para eliminar os pixels de TSM ao redor das nuvens, foram gerados histogramas de frequência acumulada das classes de temperatura para identificação dos pontos de inflexão no início da curva (Figura 4). Os valores de temperatura abaixo desse ponto de inflexão foram eliminados.

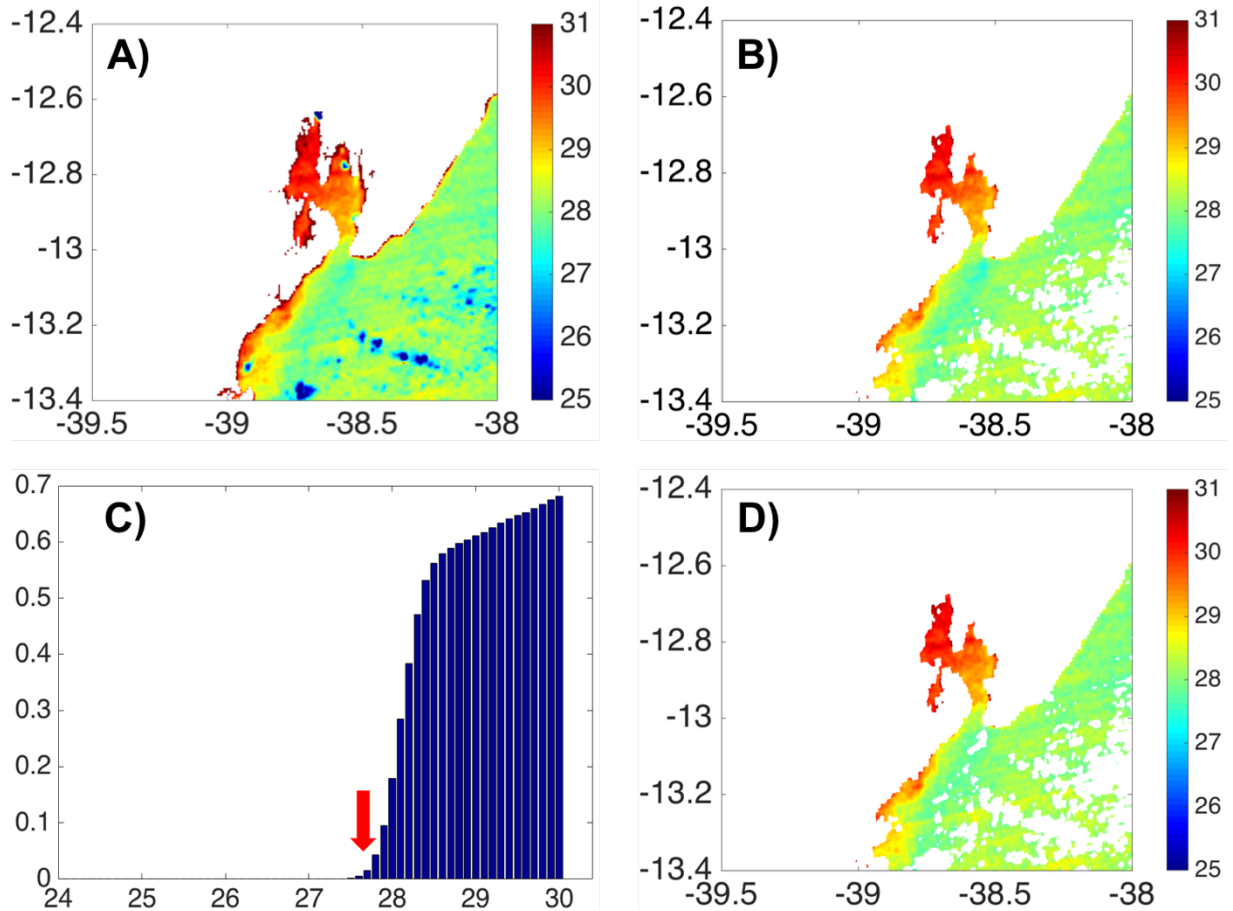


Figura 4. Eliminação de dados espúrios da TSM para o dia 07/02/2013. A) Imagem de TSM Level-2 do MODIS Aqua. B) Imagem tratada com a remoção dos pixels onde o valor de clorofila era nulo. C) Histograma de frequência acumulada de temperatura gerado para a eliminação dos valores de temperatura nas bordas das nuvens. Valores abaixo do ponto de inflexão da curva (indicado pela seta vermelha) foram eliminados. D) Imagem após a eliminação dos dados espúrios de TSM.

4.1.3 Aproveitamento de imagens

Para as imagens MODIS diárias houve um total de 7894 imagens disponíveis para a BTS no período de estudo, com uma média de 564 imagens por ano. Entretanto, após a exclusão visual de imagens com grande cobertura de nuvens, onde a BTS se encontrava na borda da imagem ou que houvesse presença de *sun glint*, foram selecionadas apenas 1742 imagens, ou seja, uma média de 62 imagens por ano. Os anos com o maior número de imagens adquiridas foram 2016 e 2014. Após o processamento nos softwares SeaDAS e MATLAB o número total de imagens utilizadas foi 297, uma média de 21 imagens por ano, acarretando em um aproveitamento total de apenas 17 % do total de imagens adquiridas e de somente 3,7 % do total de imagens disponíveis para a BTS (Figura 5).

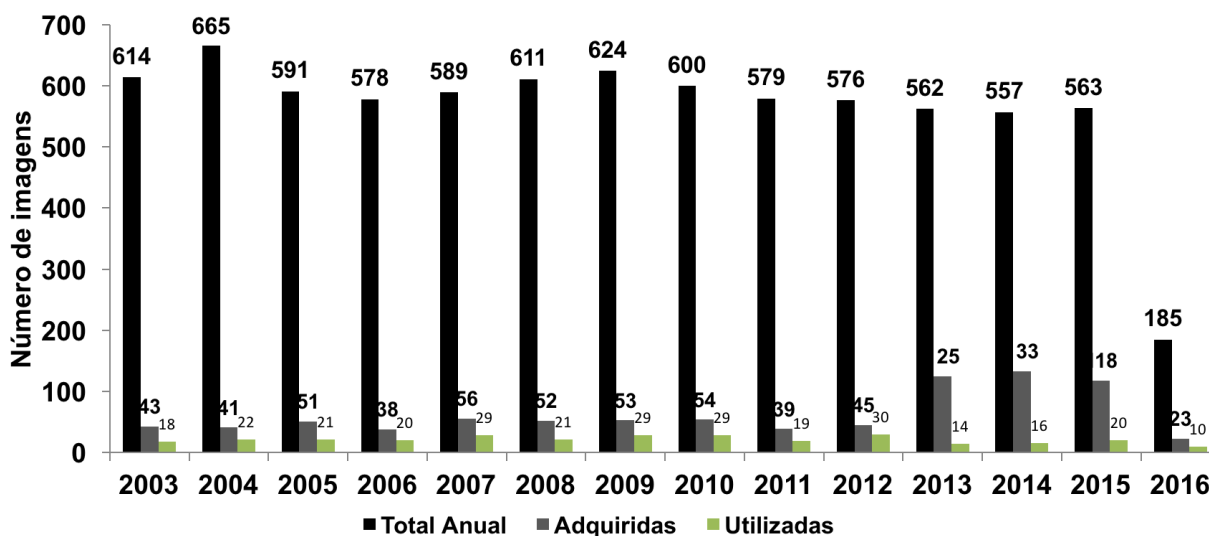


Figura 5. Gráfico do número total de imagens MODIS L1A disponíveis para o período de estudo, número total de adquiridas e utilizadas.

Considerando a distribuição anual, houve uma aquisição média de 72 imagens por mês e os meses de maior aquisição foram março, abril e agosto com mais de 80 imagens. Porém, em média, apenas 25 imagens foram utilizadas, gerando uma taxa de aproveitamento de aproximadamente 34 % em relação as imagens adquiridas, e uma média de 2 imagens para cada mês por ano durante o período de estudo (Figura 6).

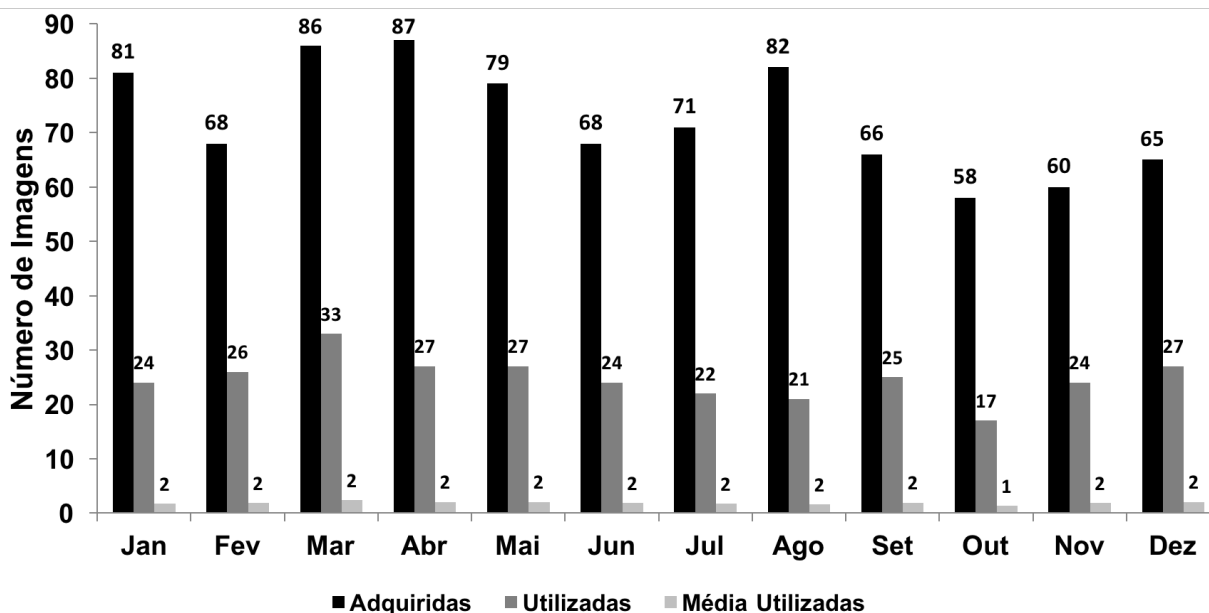


Figura 6. Gráfico do número total de imagens MODIS L1A adquiridas por mês para o período de estudo, número total de utilizadas e a média por mês.

Em termos anuais, os anos com o maior número de imagens aproveitadas foram 2007, 2009, 2010 e 2012. A disposição do número de imagens por ano variou, porém, os meses que apresentaram maior número de imagens aproveitadas em todos os anos foram dezembro, fevereiro e março (Figura 7).

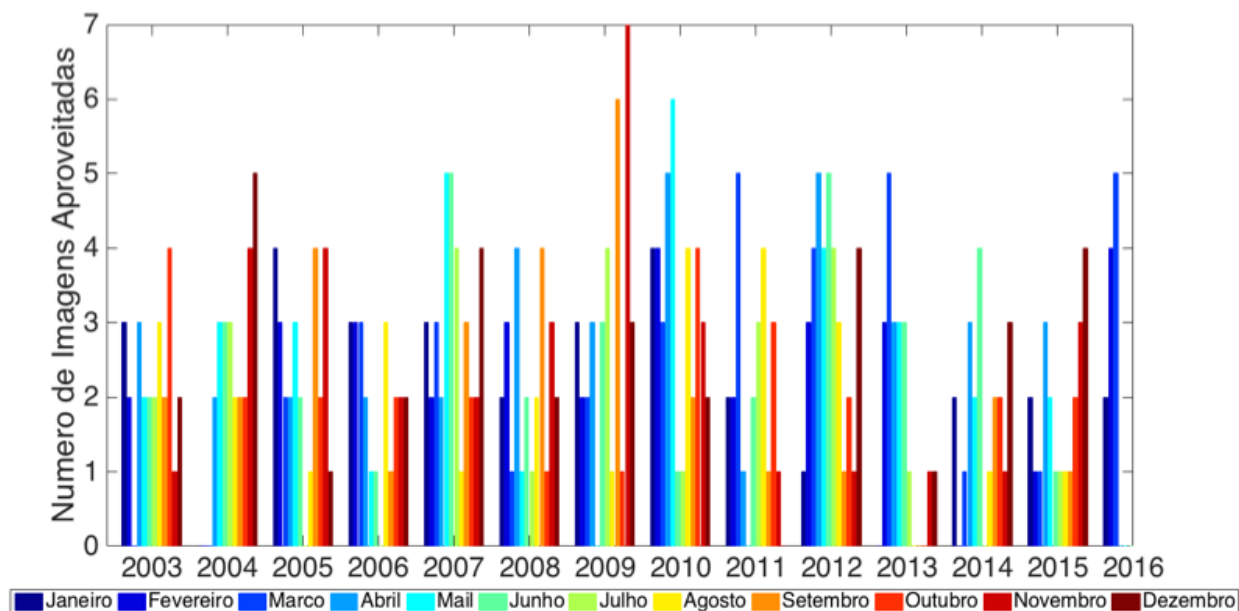


Figura 7. Gráfico do número total de imagens MODIS L1A utilizadas mensalmente para cada ano do período de estudo.

Devido ao baixíssimo aproveitamento das imagens diárias, a série temporal obtida apresentou grande ausência de dados. Desta forma, para fazer análises e estudar as tendências em escalas mensais e anuais, fez-se necessário a utilização do satélite estacionário GOES, para com maior frequência amostral da TSM gerar séries temporais mais robustas.

4.2 IMAGENS DE SATÉLITE (TSM – SATÉLITES GOES)

Os produtos de TSM do GOES-12 (Satélites geoestacionários de operações ambientais da NOAA) são derivados de um sensor multicanal de radiância (um canal no visível e quatro no infravermelho) que cobre a maior parte do Oceano Atlântico e o Golfo do México.

Esses satélites enviam dados de 15 em 15 minutos os quais são oferecidos em imagens compostas horárias ou em intervalos de 1, 3, 8 e 14 dias. A validação dos dados é feita através da comparação com valores de boias e através de algoritmos criados pela

NOAA. A resolução espacial dos dados é de 5,5 km.

Para este trabalho foram utilizadas imagens diárias em formato *.mat* de janeiro de 2001 a dezembro de 2016, obtidas gratuitamente na plataforma ERDDAP da NOAA (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap>).

4.2.1 Processamento de dados.

No site do ERDDAP, foi realizado o recorte para a região de interesse ($-13,175^{\circ}\text{S}$ / $-12,575^{\circ}\text{S}$ e $321,025^{\circ}\text{L}$ / $321,625^{\circ}\text{L}$). Após a delimitação da região, imagens diárias em formato *.mat* foram solicitadas para o período entre 01/01/2001 e 31/12/2016. O arquivo gerado, formando uma grade de 59 elementos, foi então processado no software MATLAB. O período estudado possui 5840 dias, sendo que 5790 imagens GOES estavam disponíveis.

Após análise visual, foi verificada a existência de lacunas nas séries de dados em quase todos os elementos da grade. Para evitar comparações indevidas, com elementos subrepresentados, os elementos onde a percentagem de dados válidos era inferior à quantidade média de dados de todos os elementos menos o desvio padrão foram eliminados (Figura 8).

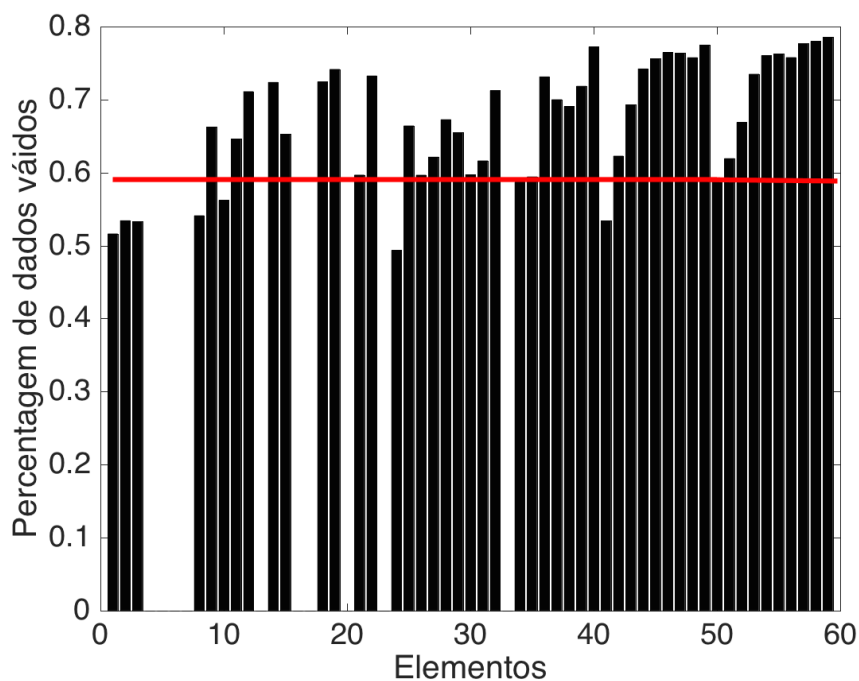


Figura 8. Percentagem de dados válidos em cada elemento da grade remanescente, a linha vermelha indica o valor da média menos o desvio padrão entre os elementos. Aqueles que contiveram menos dados que este limite foram desconsiderados.

A Figura 9A mostra os 59 elementos iniciais e, em vermelho, aqueles que foram excluídos por estarem relativamente sub-representados. A Figura 9B mostra a configuração do novo grade.

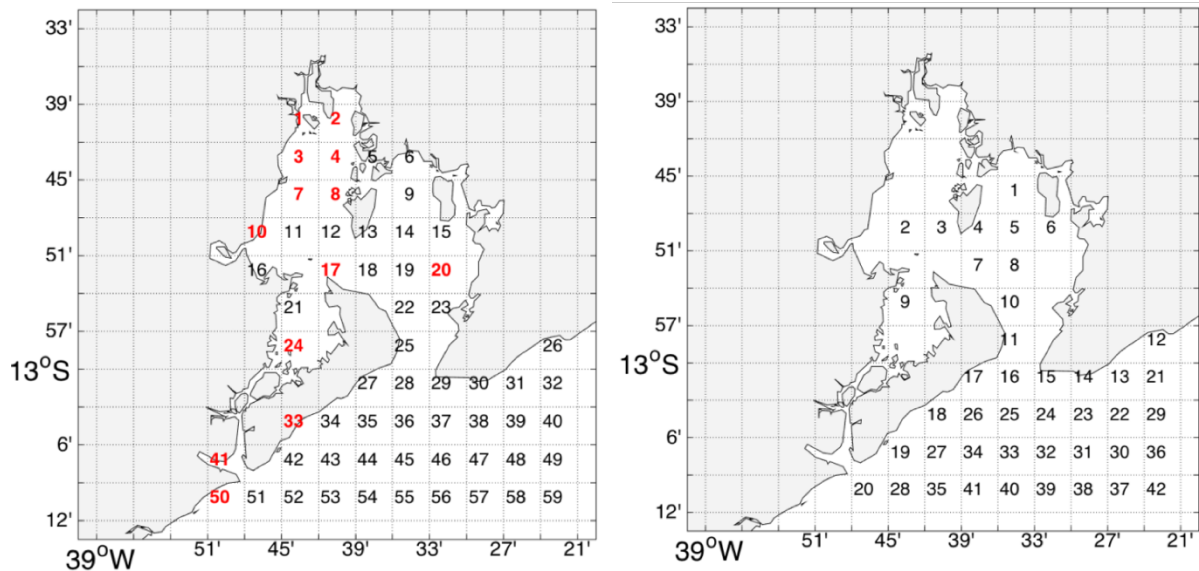


Figura 9. A) Grade GOES original para a BTS com a identificação, em vermelho, dos elementos desconsiderados. B) Grade com nova numeração.

Com o intuito de verificar a consistência inicial dos dados, foi calculado o desvio padrão em cada elemento da grade para toda a série de dados (Figura 10).

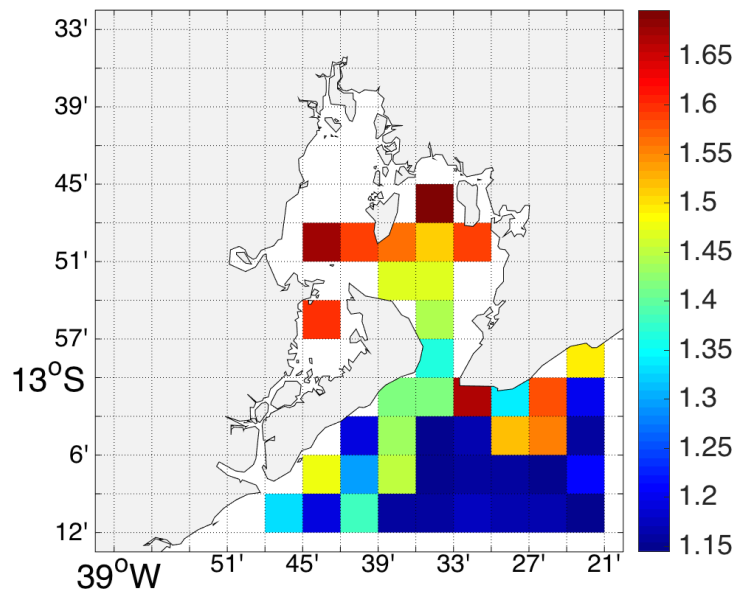


Figura 10. Desvio padrão calculado para os valores de TSM da grade.

Os elevados desvios em vários elementos da plataforma forçaram a investigação das séries temporais e comparações com dados da mesma região provenientes do MODIS. Foram escolhidos 5 elementos (14, 15, 16, 23 e 24) com alto desvio padrão para comparação com a série temporal da TSM das imagens MODIS-Aqua L3 Mapped do segmento 3, do trabalho realizado por SANTOS (2014). As imagens L3 Mapped do MODIS-Aqua são resultado de uma média aritmética para cada pixel da grade da imagem para o intervalo de 8 dias e tem resolução espacial de 4,4 km.

As séries apresentaram boa concordância com exceção dos anos de 2011 a 2013, quando os dados do GOES mostraram maior aquecimento para estes elementos. Desta forma, por similaridade, estes e os demais elementos que apresentaram altos desvios na plataforma continental foram excluídos das análises (Figura 11).

A grade final está exposta na Figura 12. Para cálculos estatísticos considerando duas grandes regiões, as áreas associadas à BTS são aquelas de número 1 a 11, e as áreas relacionadas à plataforma são de número 12 a 29.

Para evitar a análise de elementos com pouca representatividade de dados mensais e anuais, foram calculadas as percentagens de dados válidos para cada elemento, bem como suas médias e desvios. Os elementos que apresentaram uma percentagem de dados válidos menor que a média menos o desvio padrão de todas os elementos foram desconsiderados. Como exemplo, a Figura 13 demonstra a exclusão dos elementos com baixa representatividade anual.

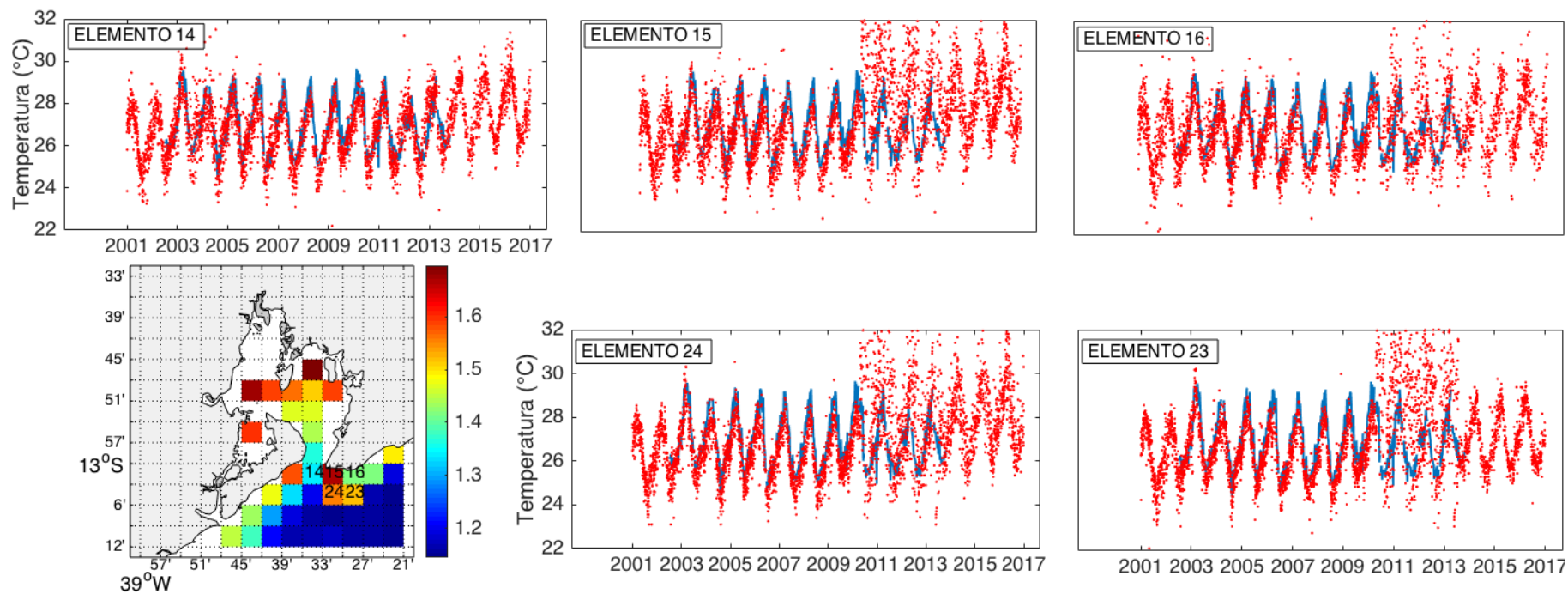


Figura 11. Aquecimento anormal dos elementos da plataforma. Nesta figura estão representados os desvios em cada elemento e as series temporais de TSM media dos elementos 14, 15, 16, 23, 24 (pontos vermelhos) e a série temporal para o segmento 3 do trabalho de SANTOS (2014) (linha continua azul).

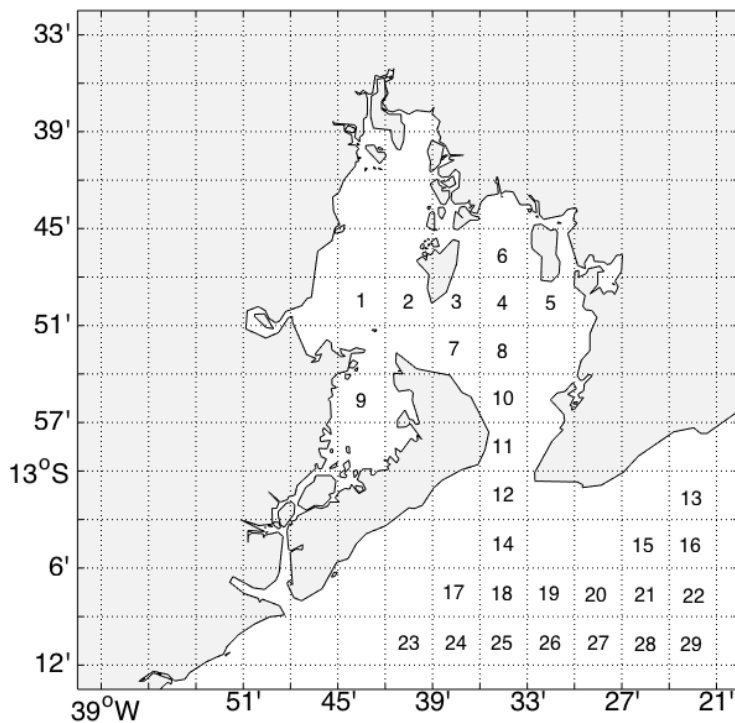


Figura 12. Zoneamento final utilizado no trabalho. Percebe-se que existem dois eixos principais para a região interna da BTS. Um na direção oeste/leste (1,2,3,4,5), e um na direção N/S (6,4,8,10,11).

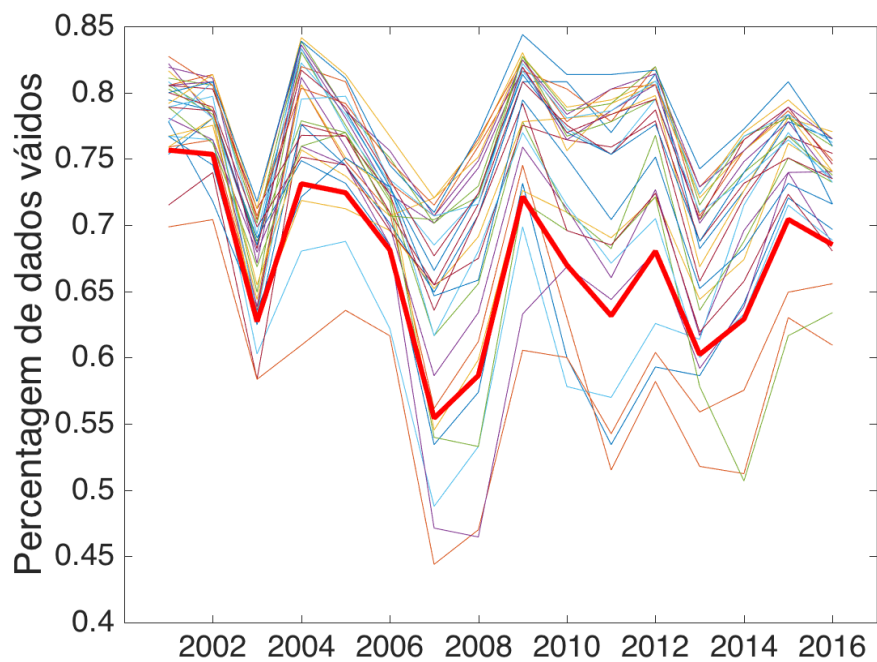


Figura 13. Percentagem de dados anuais válidos. Cada linha representa um elemento da grade. A linha vermelha é a média menos o desvio padrão das porcentagens anuais calculadas. Elementos com valores abaixo da linha vermelha foram desconsiderados.

4.3 DADOS DE VENTO.

Dados de vento, com médias horárias para os anos de estudo, foram obtidos gratuitamente através do PROTIM (Portal de Tecnologia da Informação para Meteorologia) no site do CPTEC (<http://bancodedados.cptec.inpe.br/downloadBDM/>).

Os dados utilizados são referentes a estação METAR-TAF SBSV, localizada no aeroporto de Salvador, com coordenadas 12° 54' S e 38° 20' W e fixado a uma altura de 6 m.

5 RESULTADOS

5.1 COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS SATÉLITES.

Devido à diferença entre as suas resoluções espaciais, a quantidade de pixels para a imagem de cada satélite é diferente. Para a mesma região, em um pixel do GOES existem 441 pixels do MODIS. Para verificar a correspondência dos dados, duas áreas com grande aproveitamento de dados foram escolhidas, uma dentro (elemento 4) e outra fora (elemento 27) da BTS (Figura 14).

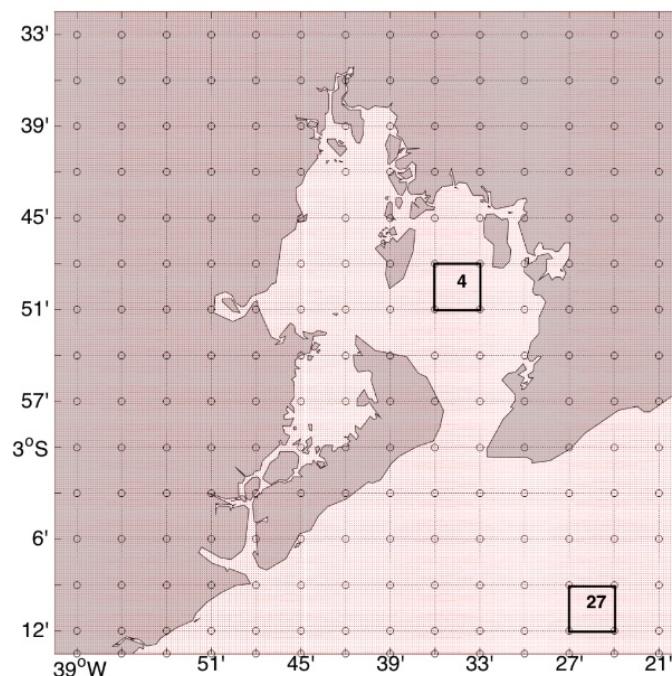


Figura 14. Representação espacial dos elementos utilizados para validação dos dados (elementos 4 e 27). As linhas pretas estão representando os pixels do GOES enquanto os pontos vermelhos representam os pixels do MODIS-Aqua.

A Figura 15 mostra a distribuição temporal da TSM média diária dos dois sensores, onde se observa a correspondência entre os ciclos sazonais de aquecimento e resfriamento, porém com as temperaturas registradas pelo MODIS mais elevadas. O coeficiente de correlação (R^2) entre as imagens diárias do GOES e MODIS-Aqua é de 0,9 na plataforma e de 0,8 dentro da BTS (Figura 16). A TSM média do MODIS dentro e fora da BTS foi de 28,0 °C, e 27,3 °C. Estes valores são maiores do que a TSM média do GOES em aproximadamente 1 °C, já e os valores medidos por este satélite foram de 27,3 °C dentro e 26,3 °C fora da baía. O desvio padrão da TSM dos dois satélites é muito semelhante, sendo maiores dentro da baía. Os desvios na plataforma diferem em apenas 0,2 °C (maior no MODIS - Tabela 1) enquanto que dentro da baía a diferença diminui para 0,1 °C, com maiores valores associados ao GOES.

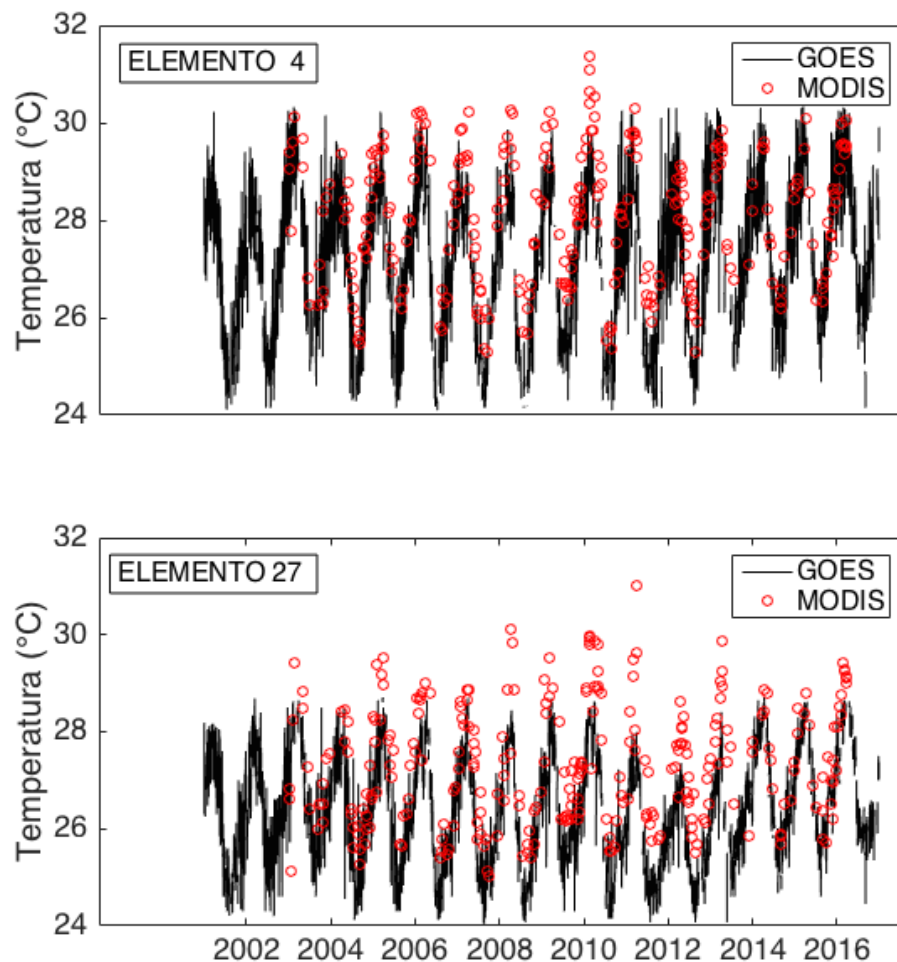


Figura 15. Série temporal para os elementos utilizados para a comparação. Dados do GOES representados pela linha contínua preta e dados do MODIS representados pelos círculos vermelhos. Percebe-se que os valores de TSM do MODIS são quase sempre mais elevados.

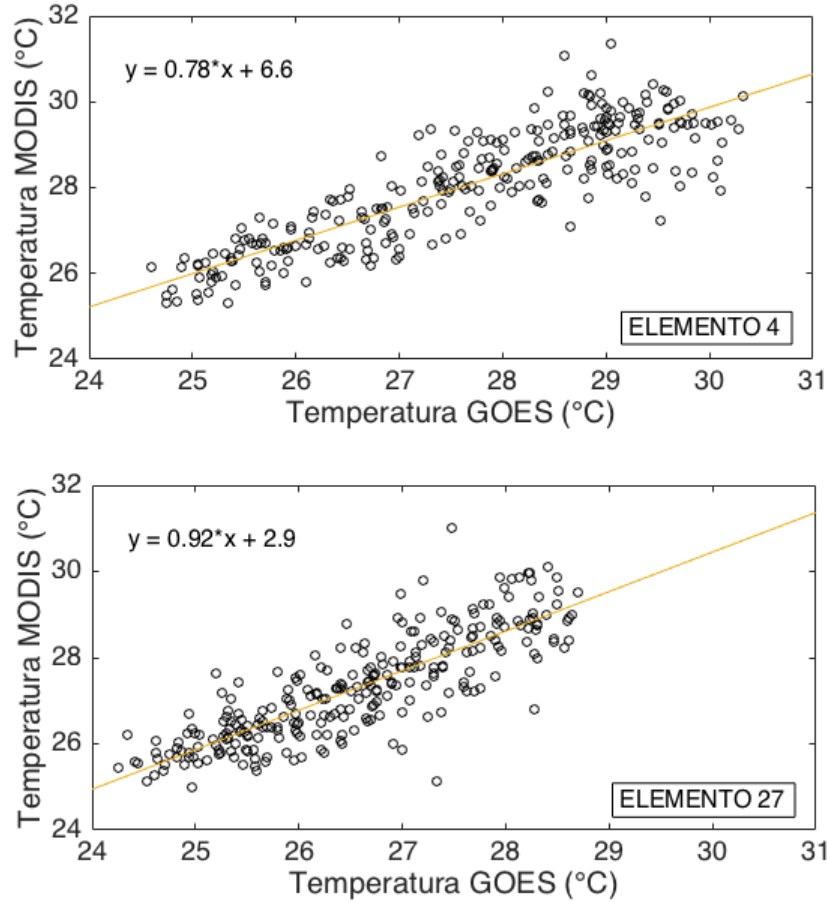


Figura 16. Coeficiente de correlação na BTS (elemento 4) e na plataforma (elemento 27) entre os valores da TSM média diária entre os satélites MODIS-Aqua e GOES.

Tabela 1. TSM média e desvio padrão (entre parênteses) dos os elementos de comparação, entre os dois satélites, na BTS (elemento 4) e na plataforma (elemento 27).

| ELEMENTO | MODIS °C | GOES °C |
|----------|-------------|------------|
| 4 | 28,0 (1,4) | 27,3 (1,5) |
| 27 | 27,3 (1,2) | 26,3 (1,0) |

A distribuição temporal da climatologia (Figura 17A) e da TSM média anual (Figura 17B) dos dois sensores apresentaram correspondência entre os ciclos de aquecimento e resfriamento tanto na BTS quando na plataforma. Entretanto, novamente com as temperaturas registradas pelo MODIS sendo aproximadamente 1 °C mais elevadas do que as registradas pelo GOES.

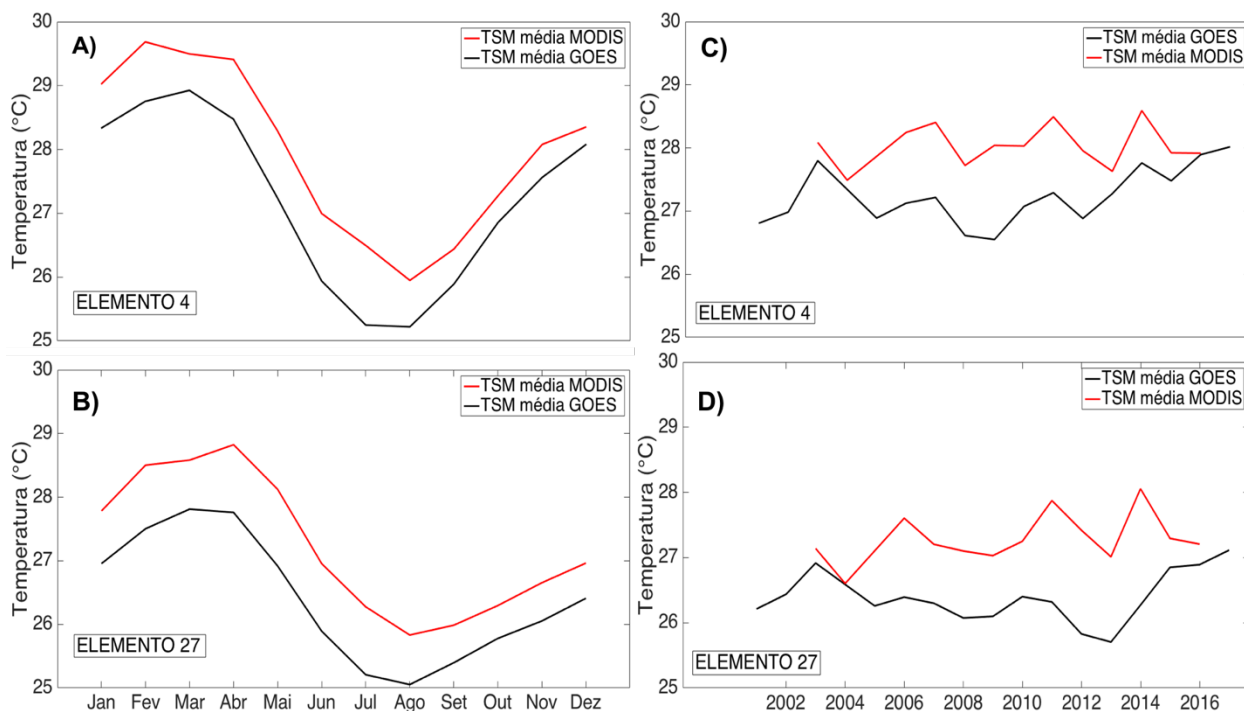


Figura 17. Climatologia da TSM (A e B) e variação da TSM média anual (C e D) para os elementos 4 e 27 da grade.

5.2 VARIAÇÃO DE LONGO PRAZO DA TSM

A TSM média de toda a BTS nos 16 anos de coleta de dados foi 0,8 °C mais elevada que para toda a plataforma, ou seja, 27,2 °C dentro da baía e 26,4 °C na plataforma. Considerando os elementos individuais, os valores de TSM médios mais elevados ocorreram dentro da BTS (Figura 18A), com média máxima de 27,4 °C no elemento 9. O maior valor médio da TSM registrado na plataforma foi de 26,8 °C no elemento 12. Os valores máximos de TSM na BTS foram próximos de 32 °C, enquanto que na região da plataforma a máxima foi de 31,5 °C (Figura 18B).

As TSM mínimas, por outro lado, apresentaram pouca variação espacial, sendo 22,0 °C na BTS e na plataforma (Figura 18C). Devido às maiores amplitudes dentro da baía, o desvio padrão máximo da TSM, de 1,5 °C, foi calculado dentro da BTS. Observa-se o claro aumento dos desvios padrões da plataforma em direção às regiões mais abrigadas da baía (Figura 18D).

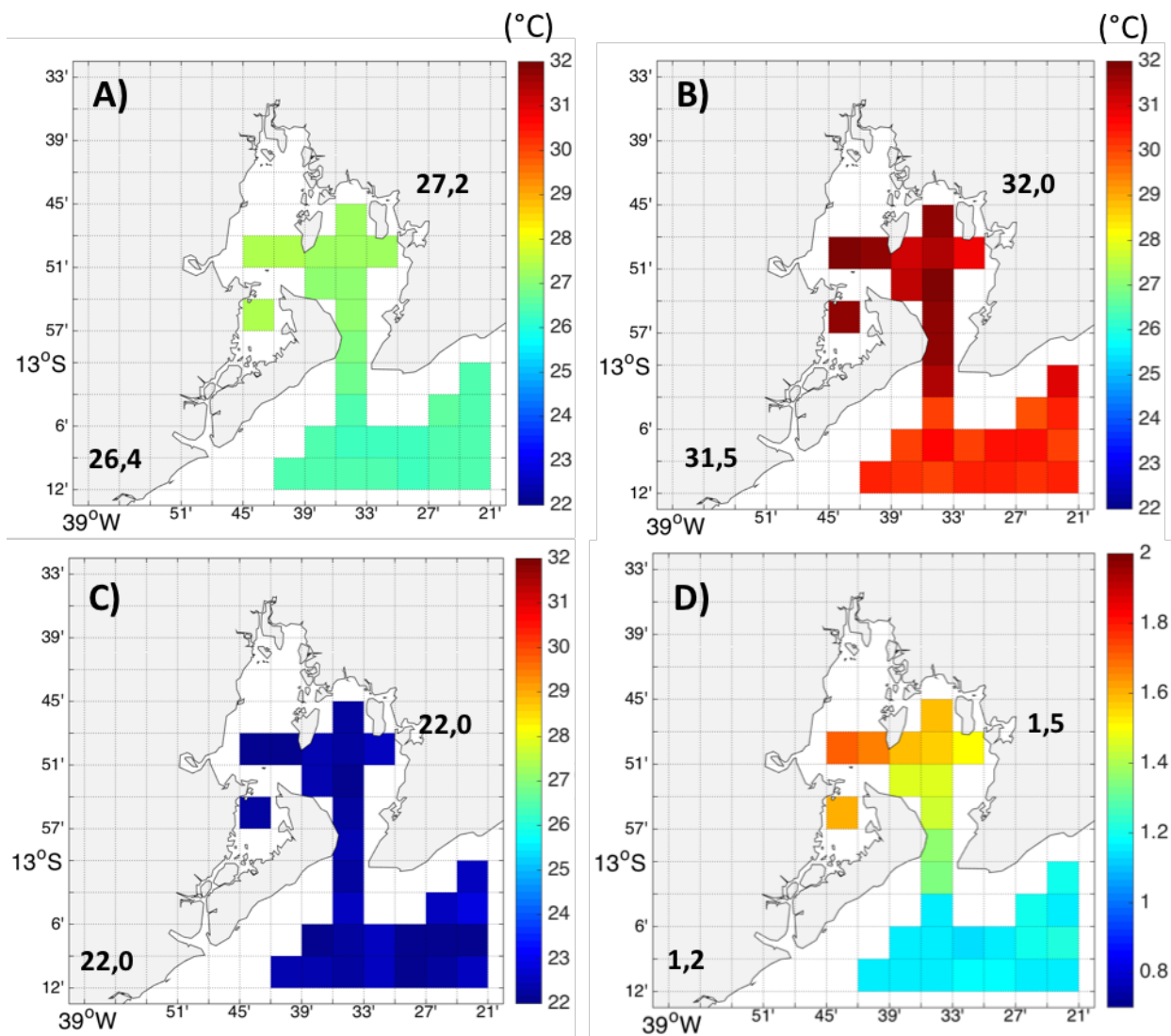


Figura 18. Variação da TSM no período de 16 anos. A) TSM medias. B) TSM máxima, C) TSM mínima e D) desvio padrão. Os valores em preto no canto superior direito das imagens são os valores absolutos para a BTS, e no canto inferior esquerdo da plataforma.

5.3 VARIAÇÃO ANUAL DA TSM

As temperaturas médias anuais dentro da BTS foram sempre maiores do que aquelas na plataforma. A temperatura média anual dentro da baía variou entre 26,6 °C a aproximadamente 28,0 °C, e fora da baía entre 25,8 °C a 27,0 °C (Figura 19 e Figura 20). Observa-se um aquecimento em toda a região de estudo no ano de 2003 e entre os anos de 2013 a 2016. Os anos de 2011 e 2012 apresentaram as menores TSM médias na plataforma, e o ano de 2007, as menores dentro da BTS (Figura 19).

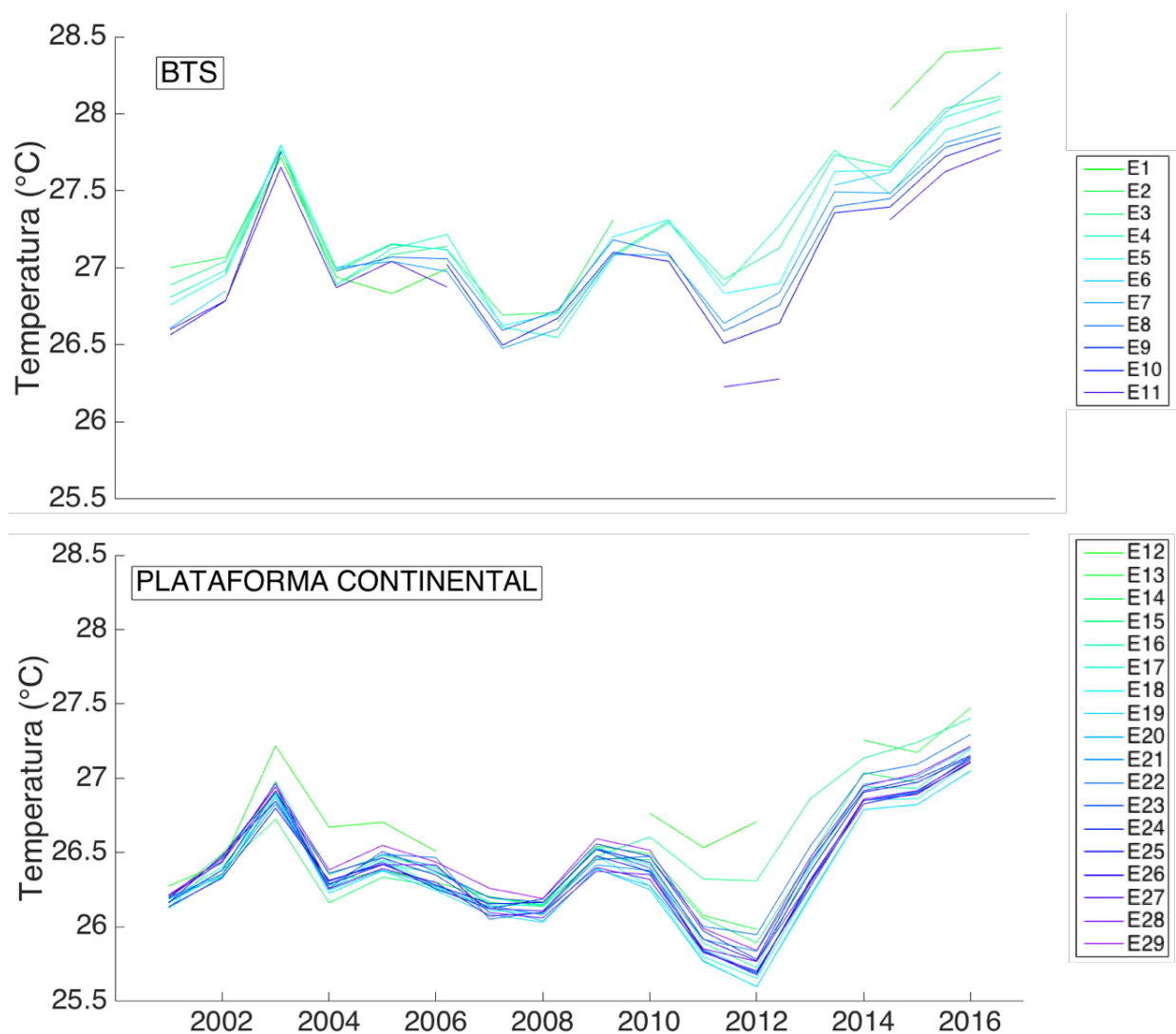


Figura 19. Variação anual da TSM média para a BTS e para a plataforma. As linhas representam elementos da grade.

A TSM na BTS apresentou maiores desvios padrões que na região da plataforma em todos os anos. Os anos com maior desvio na plataforma foram 2003 e 2010, com 1,2 °C e 1,3 °C, respectivamente. Os anos com menor desvio foram os de 2012 e 2013 (0,9 °C). Para a BTS, os maiores desvios foram encontrados nos anos de 2006 e 2008, com 1,7 °C e 1,6 °C, respectivamente. As regiões mais abrigadas da BTS, no setor oeste, tenderam a apresentar maiores desvios (Figura 21).

Em todos os anos a BTS apresentou TSM máximas maiores que aquelas na plataforma. A TSM máxima anual variou entre 29,9 °C e 31,3 °C na BTS, e entre 28,3 °C e 30,2 °C na plataforma. Nos anos de 2011, 2012 e 2013, a plataforma apresentou as menores TSM máximas, e desde 2013 está havendo um aparente aquecimento. O ano de 2003 foi o que apresentou as maiores TSM máximas, tanto dentro quanto fora da BTS (Figura 22).

A TSM mínima anual na BTS foi mais baixa que na plataforma na maioria dos anos estudados (Figura 23). As menores TSM registradas dentro da BTS variaram entre 22,5 °C e 24,7 °C, e entre 22,7 °C e 25 °C na região da plataforma.

A variação anual máxima da TSM na BTS foi maior que na plataforma. A variação mínima anual de temperatura na BTS foi de 5,6 °C em 2016 e a máxima de 7,8 °C em 2013 e na plataforma de 4,4 °C em 2015 a 6,3 °C em 2001.

As diferenças de temperatura média anual entre os elementos da grade estão representados na Figura 24. As diferenças de temperatura média anual entre os elementos dentro da BTS foram inferiores a 0,4 °C. As diferenças de TSM entre os elementos da BTS e os da plataforma foram de 0,6 °C a 1,0 °C nos anos com temperaturas médias mais frias, mas se tornaram maiores que 1 °C entre os anos de 2010 a 2016. A diferença máxima atingida foi no ano de 2013 de aproximadamente 1,8 °C.

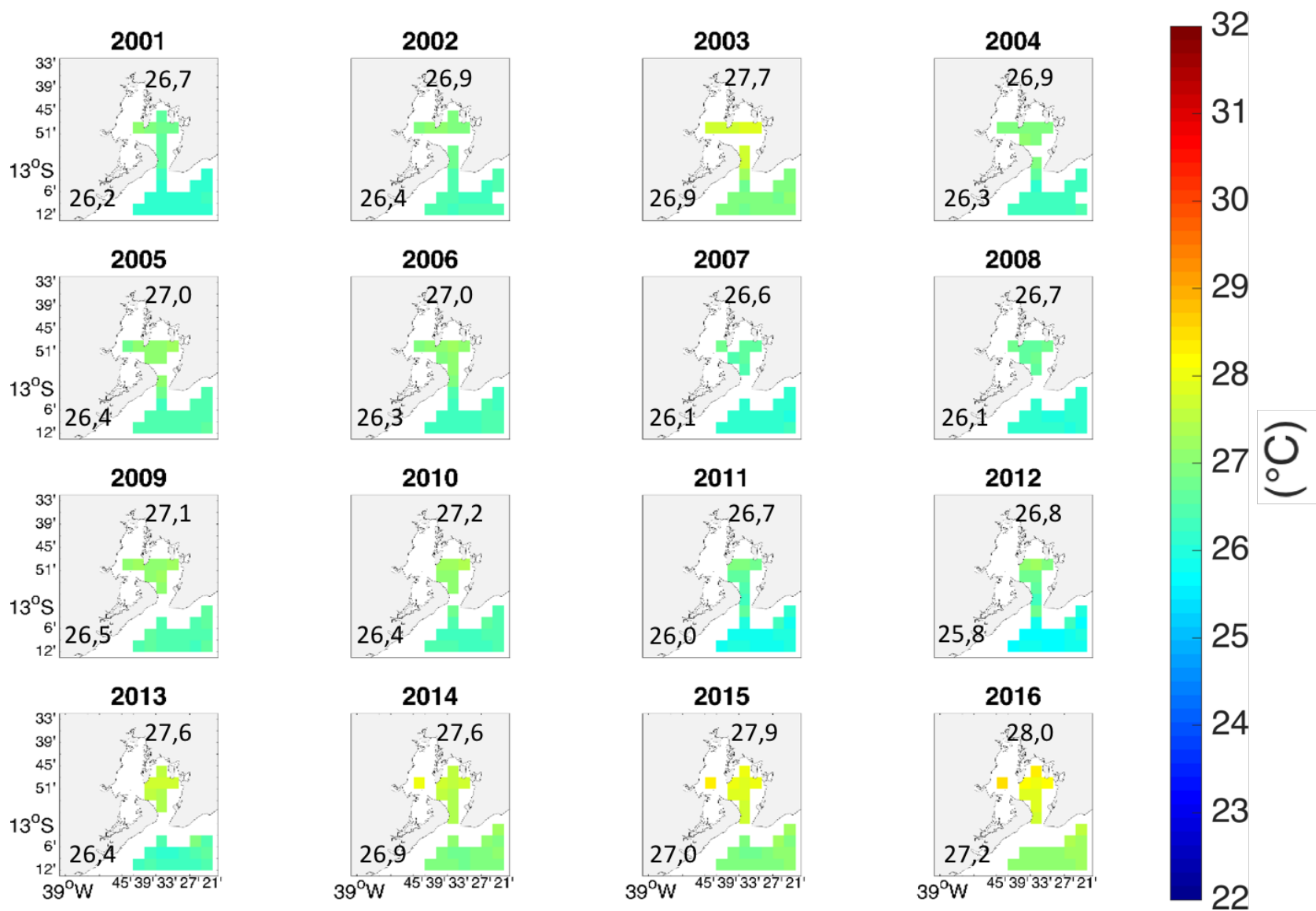


Figura 20. Variação anual da TSM média para a região. Valores em preto indicam as médias absolutas para a BTS (acima) e plataforma (abaixo).

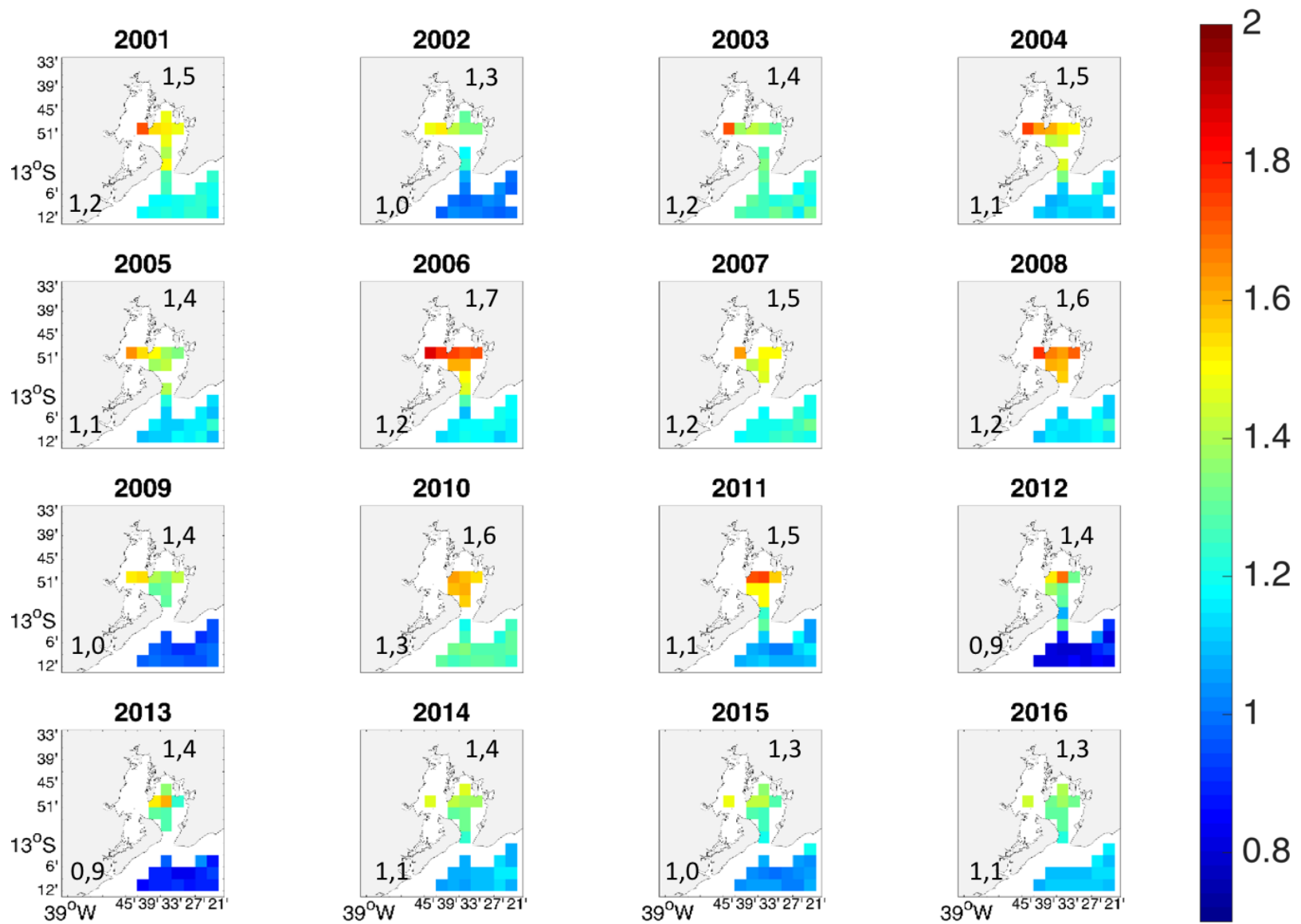


Figura 21. Desvio padrão anual calculado para a região. Valores em preto representam os desvios médios anuais para a BTS (acima) e plataforma (abaixo).

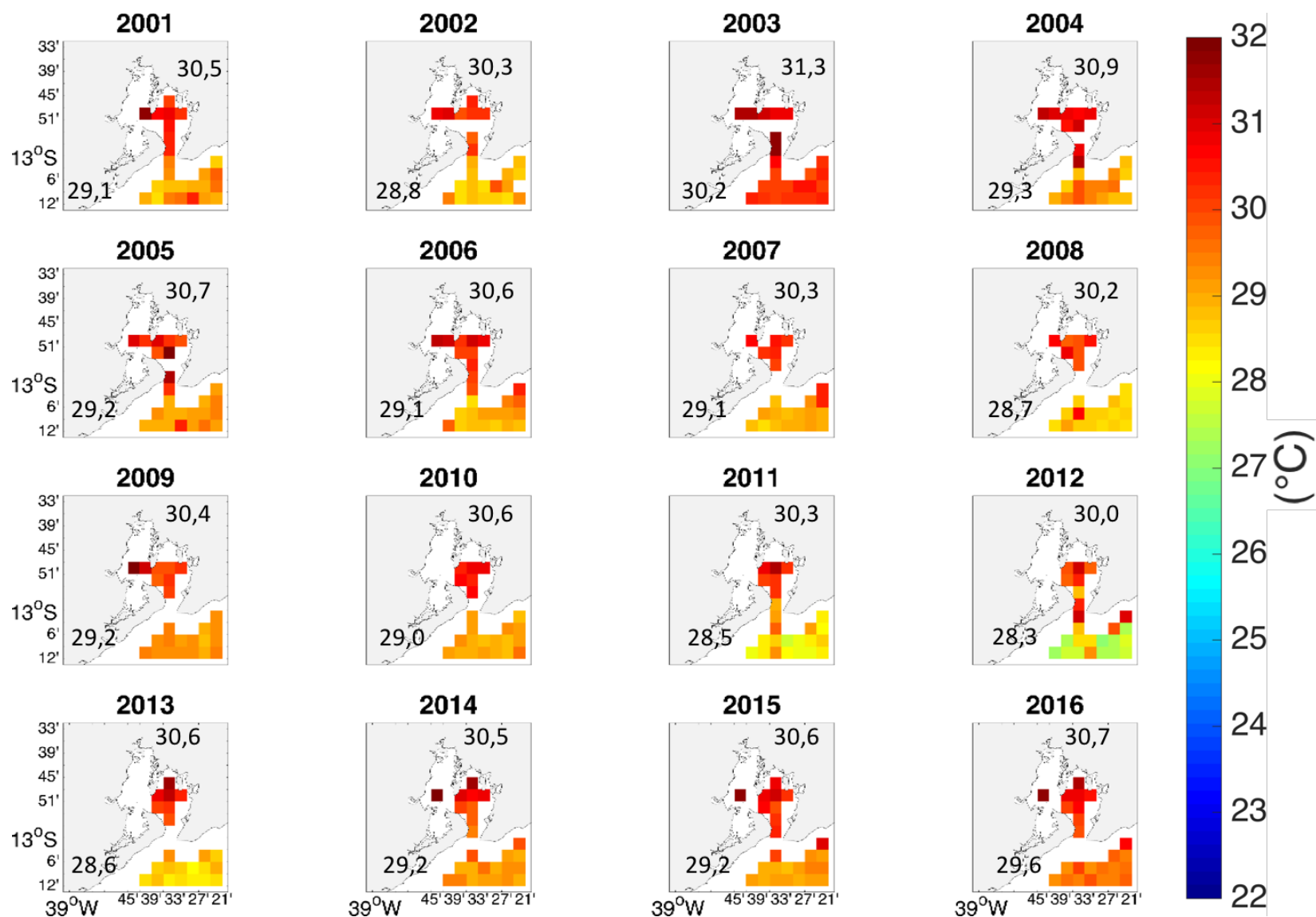


Figura 22. *Variação anual das temperaturas máximas registradas para a região de estudo. Valores em preto representam a média das temperaturas máximas anuais para a BTS (acima) e plataforma (abaixo).*

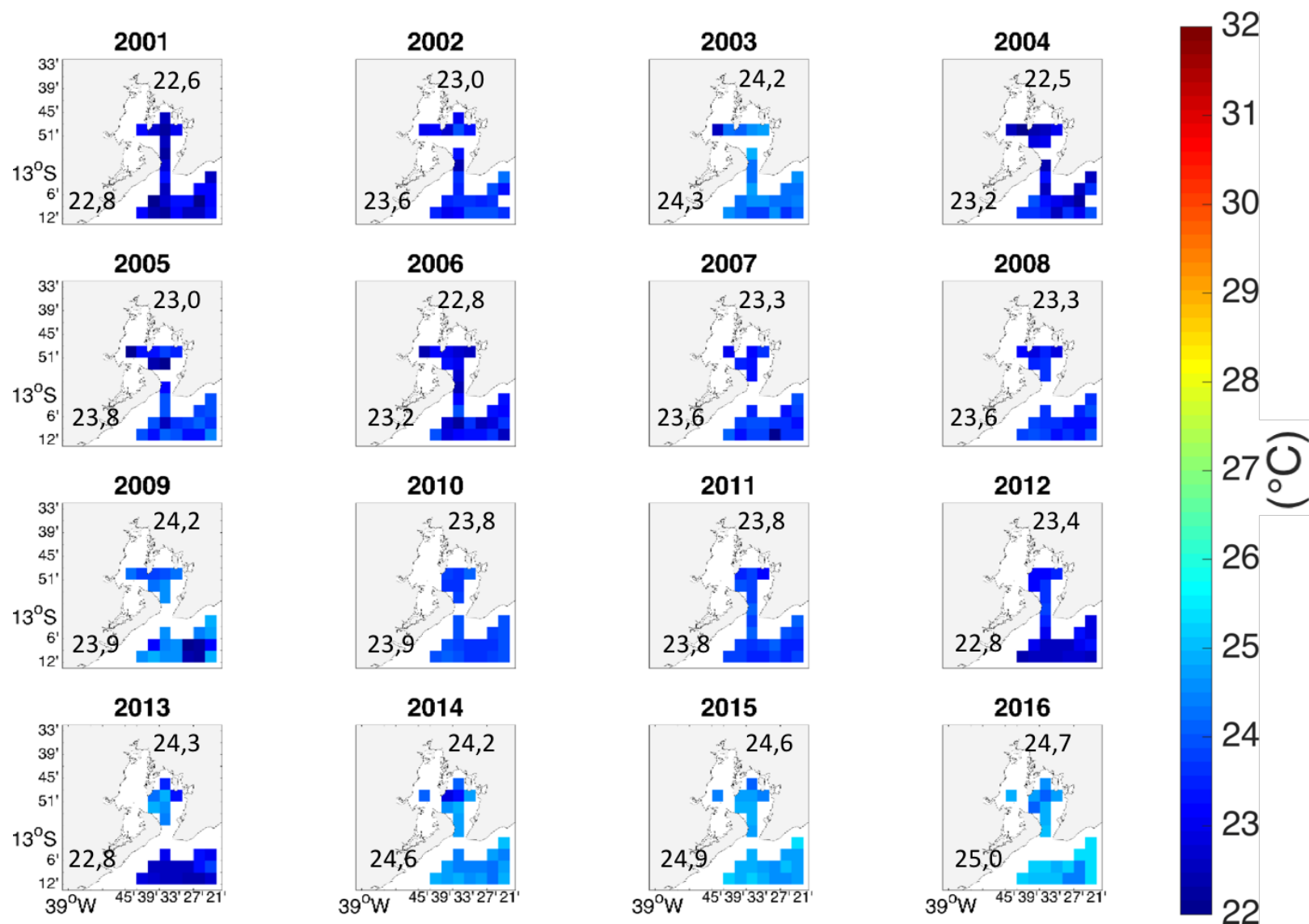


Figura 23. Variação anual das temperaturas mínimas registradas para a região de estudo. Valores em preto representam a média das temperaturas mínimas anuais para a BTS (acima) e plataforma (abaixo).

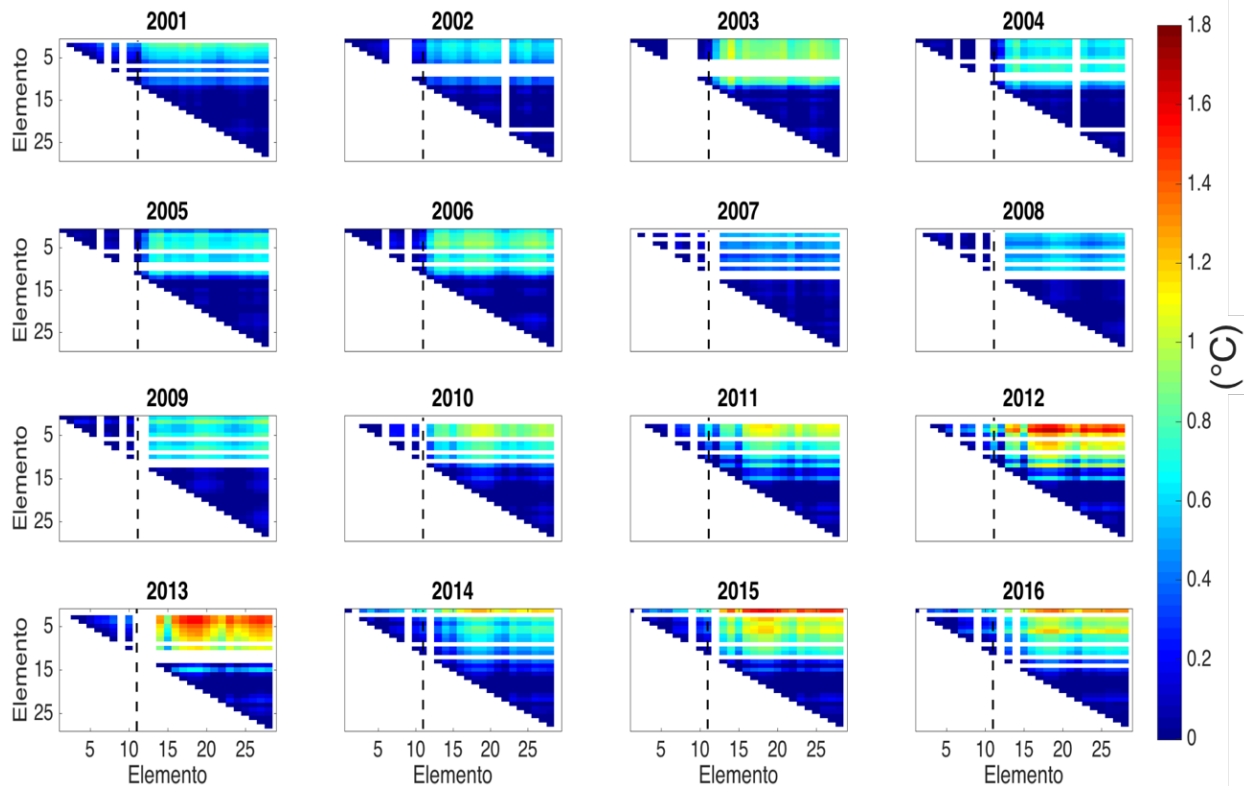


Figura 24. Diferença de temperatura média anual entre os elementos da grade. A linha pontilhada delimita a BTS (a esquerda) e a plataforma (a direita).

5.4 VARIAÇÃO MENSAL DA TSM

A TSM apresentou clara oscilação sazonal. O aquecimento na plataforma foi retardado em relação à BTS; os valores máximos de temperaturas médias foram atingidos no mês de março na BTS e na plataforma no mês de abril, com exceção dos elementos 13, 15, 22, e 29, no extremo oeste da grade, que também atingiram as máximas médias em março. Porém, o período de resfriamento é sincrônico nas duas regiões, atingindo TSM médias muito semelhantes em junho, julho e agosto (Figura 25).

As tendências de aquecimento e resfriamento observadas nas variações anuais da TSM média também podem ser observadas nas variações da TSM mensais. Observa-se na Figura 26 que o ano de 2003 e de 2013 a 2016 apresentaram temperaturas máximas mais elevadas e mínimas menos frias do que nos demais anos.

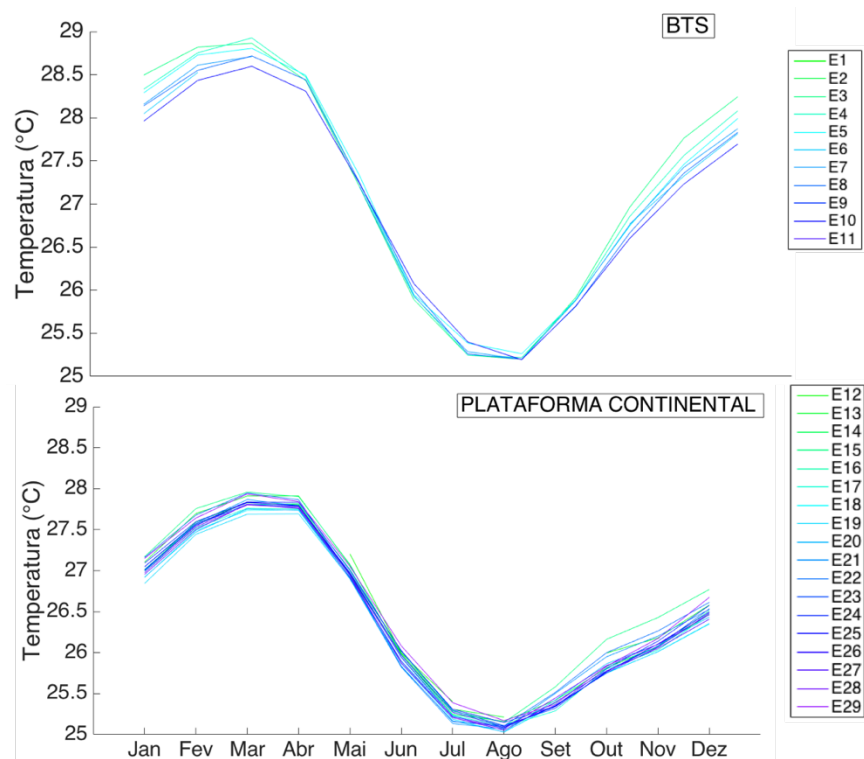


Figura 25. Climatologia da TSM média mensal para a BTS e para a plataforma. As linhas representam os elementos da grade.

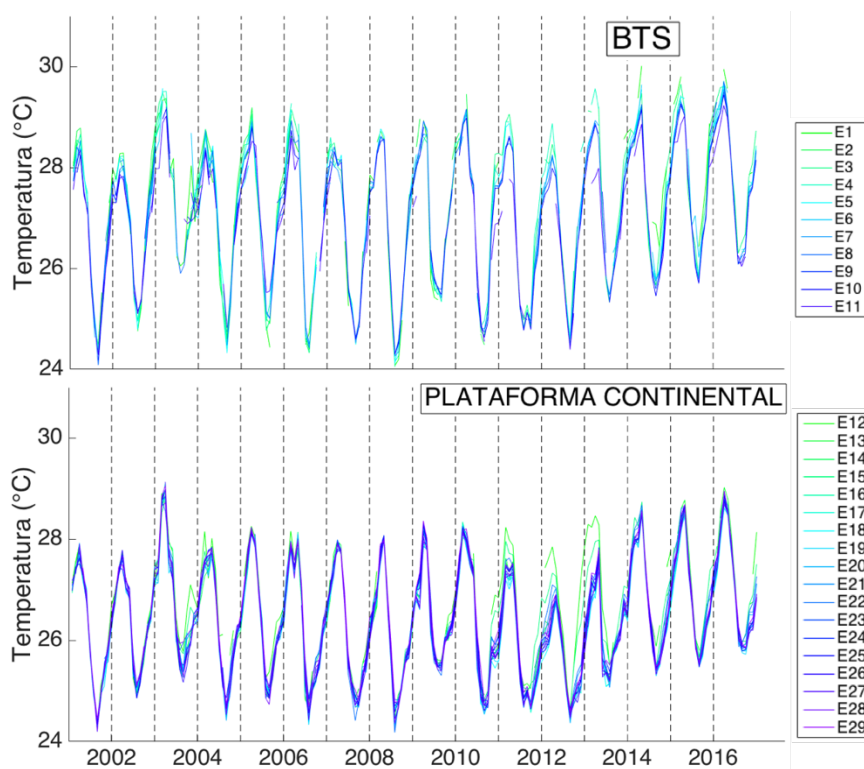


Figura 26. Variação da TSM média mensal na BTS e na plataforma. As linhas representam elementos da grade.

As águas foram aquecidas na baía e na plataforma entre setembro e março, e sofreram resfriamento de abril a agosto. A TSM média mensal na região da BTS variou de 25,2 °C a 28,7 °C, enquanto que na plataforma esta oscilou entre 25,1°C e 27,7°C (Figura 27). As variações sazonais médias de temperatura na BTS e na plataforma foram de 2,5 °C e 2,4 °C no verão e de 3,1 °C e 2,7 °C no inverno, respectivamente.

Os desvios padrões apresentaram comportamentos distintos. Para a BTS estes variaram de 0,7 °C a 1 °C, enquanto que na plataforma variaram de 0,6 °C a 0,8 °C. Os maiores desvios para a BTS foram encontrados no mês de agosto, enquanto que na plataforma no mês de maio (Figura 28).

As TSM máximas na BTS variaram entre 28,4°C e 31,3 °C, enquanto que na plataforma as máximas variaram entre 27,3 °C a 30,1 °C (Figura 29). O mês que apresentou valores de TSM mais elevados foram fevereiro para a BTS e março para a plataforma. Percebe-se também que a região da entrada do Canal de Salvador apresentou temperaturas elevadas mesmo nos meses onde as máximas nas regiões internas da BTS e na plataforma variam entre 27 e 28 °C

As menores temperaturas na BTS variaram entre 22,3 °C a 25,8 °C, enquanto que na plataforma as mínimas variaram entre 22,6 °C a 25,1 °C. Nos meses de junho, agosto e setembro a BTS registrou temperaturas mais baixas do que na plataforma (Figura 30).

A Figura 31 apresenta as diferenças entre os valores das médias mensais da TSM para toda a região. Existe um claro gradiente de temperatura do interior da BTS (alta temperatura) para a região da plataforma (baixa temperatura), que se tornou mais acentuado nos meses de verão, quando as diferenças atingiram 2,0 °C. Durante o período de resfriamento nos meses de outono e inverno, as diferenças de TSM diminuíram progressivamente, alcançando valores inferiores a 0,2 °C entre junho e agosto.

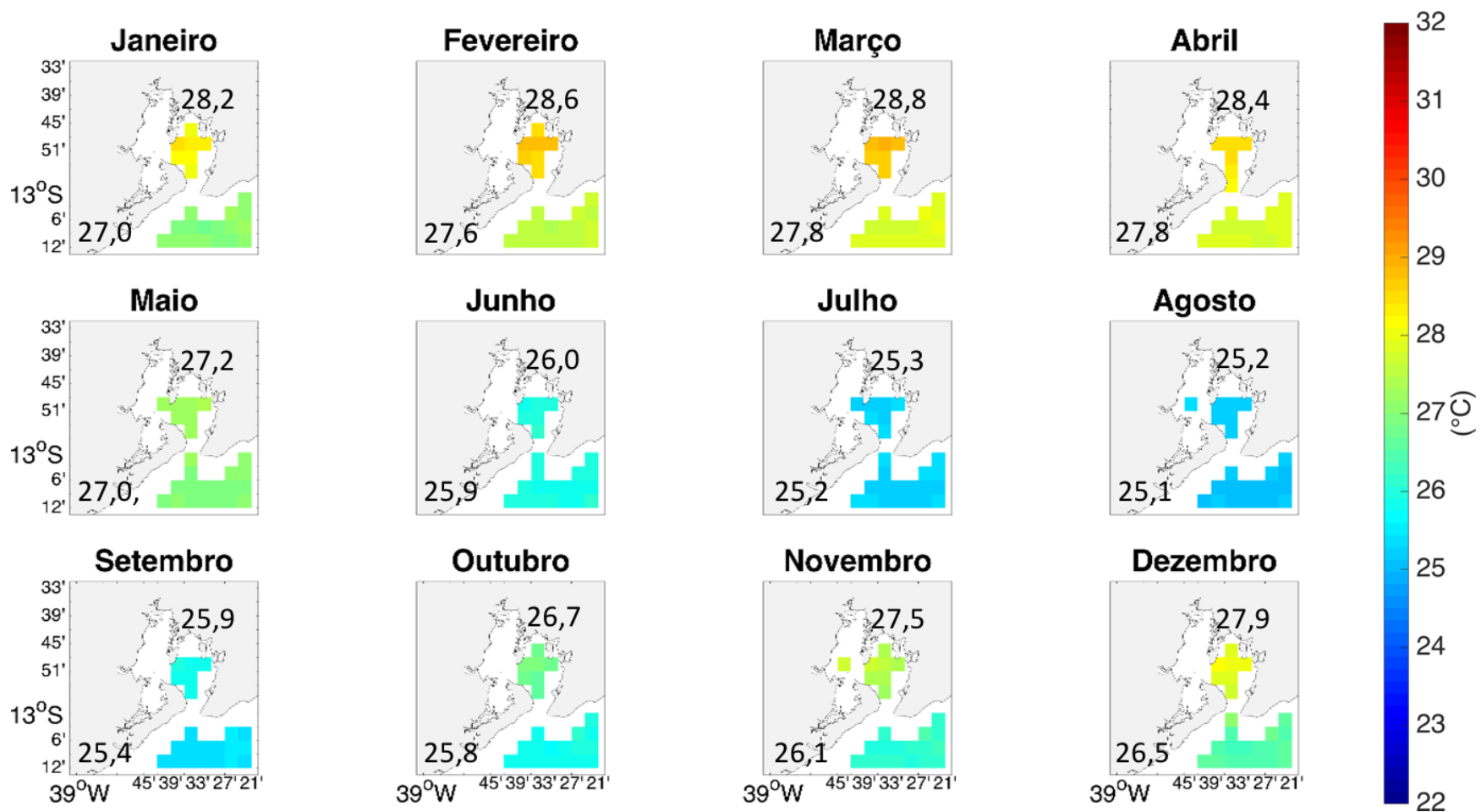


Figura 27. Variação da TSM média mensal (climatologia) para a região de estudo. Valores representam a TSM média para BTS (acima) e para plataforma (abaixo).

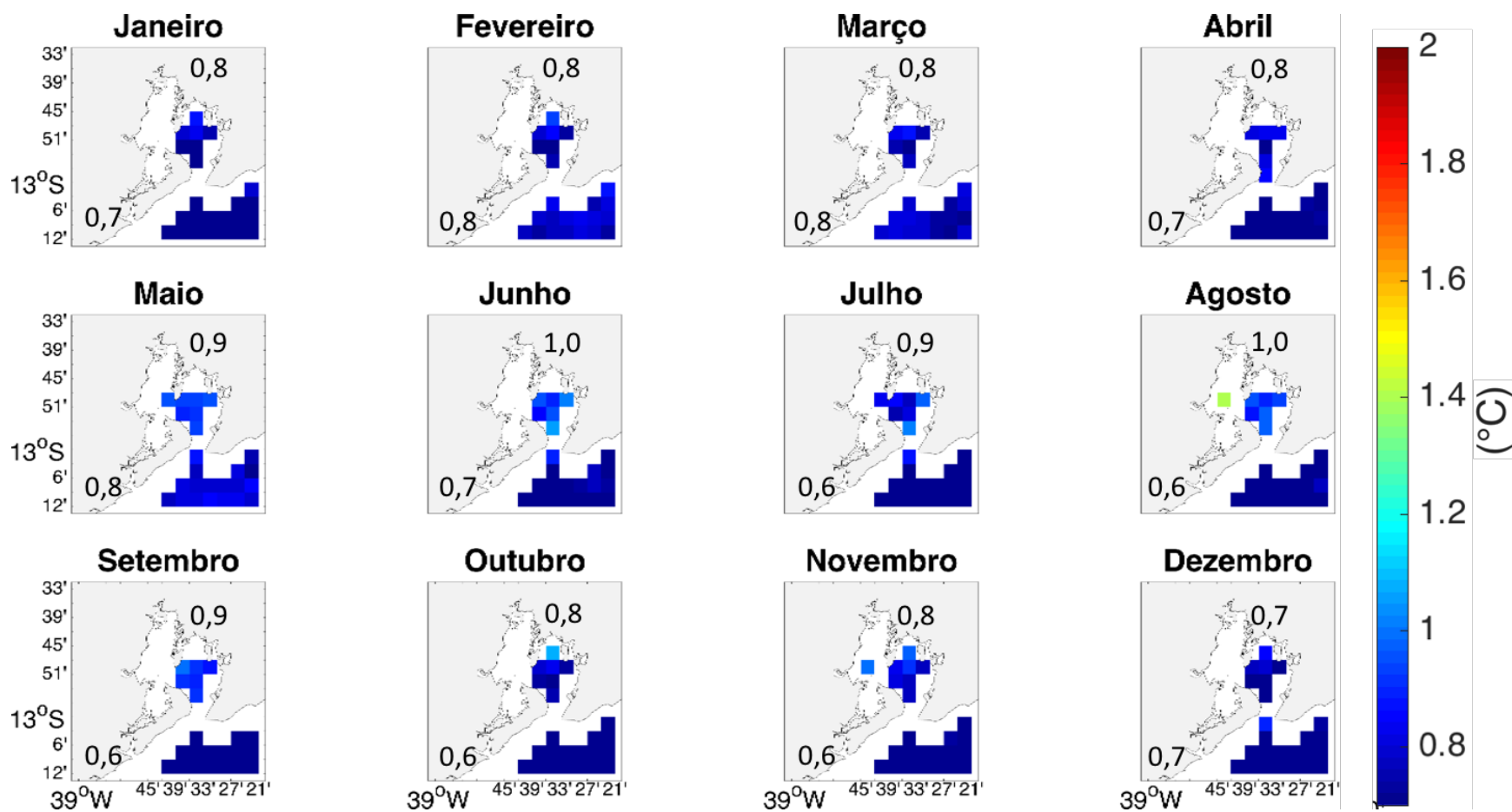


Figura 28. Desvio padrão médio mensal calculado para a região de estudo. Valores representam os desvios médios mensais para a BTS (acima) e plataforma (abaixo).

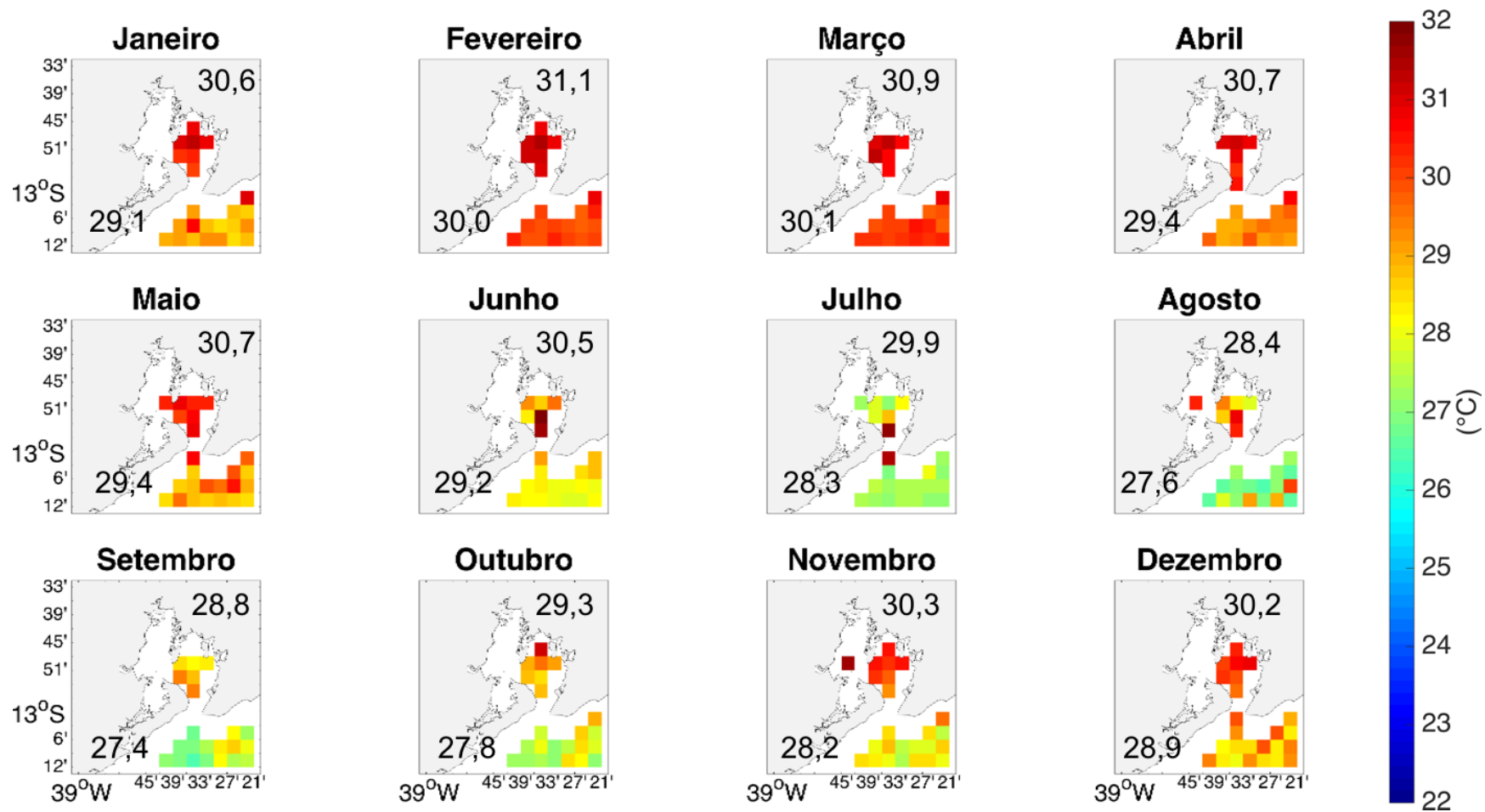


Figura 29. Variação da TSM máxima mensal registrada para a região de estudo. Valores representam a TSM média para BTS (acima) e para plataforma (abaixo).

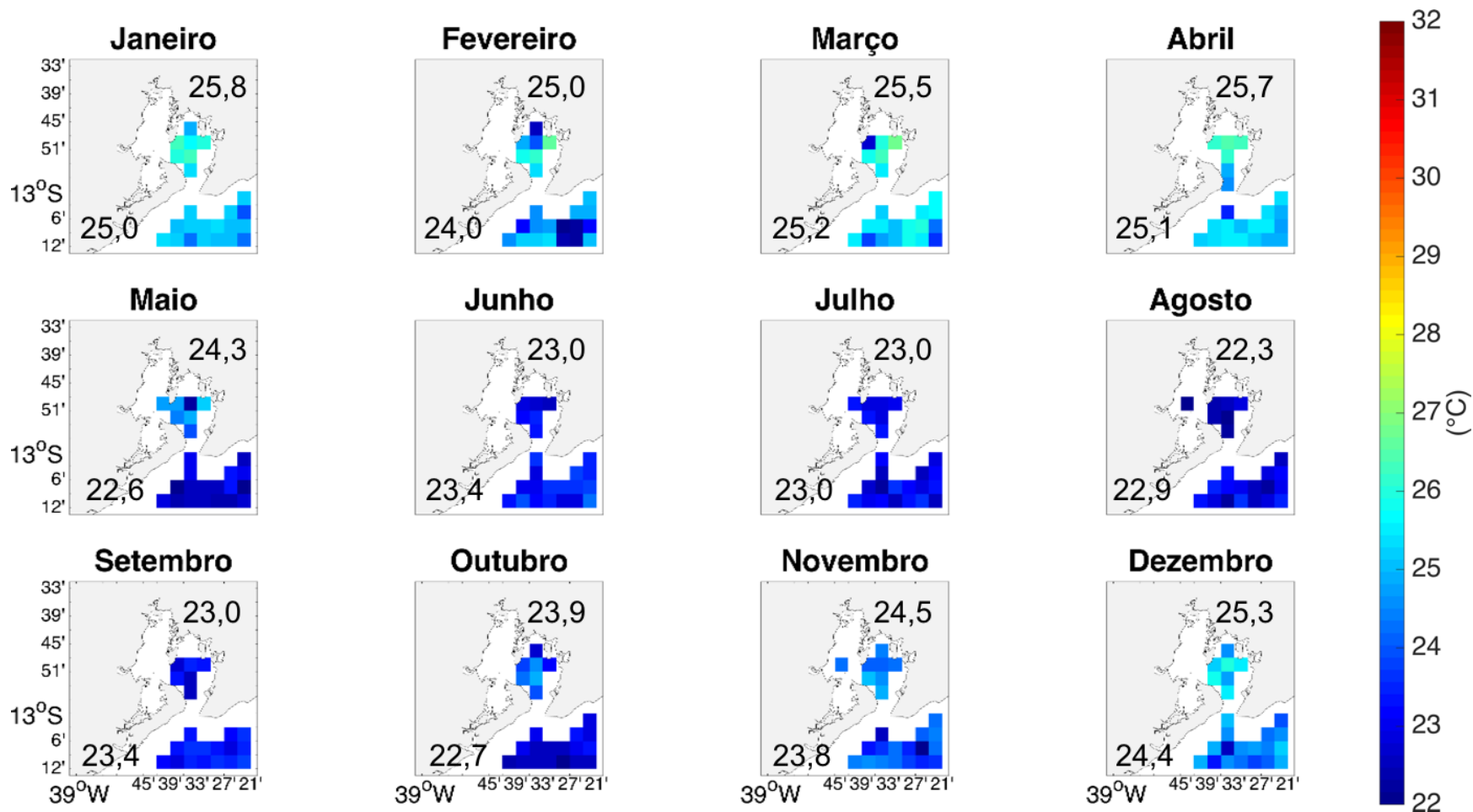


Figura 30. Variação da TSM mínima mensal registrada para a região de estudo. Valores representam a TSM média para BTS (acima) e para plataforma (abaixo).

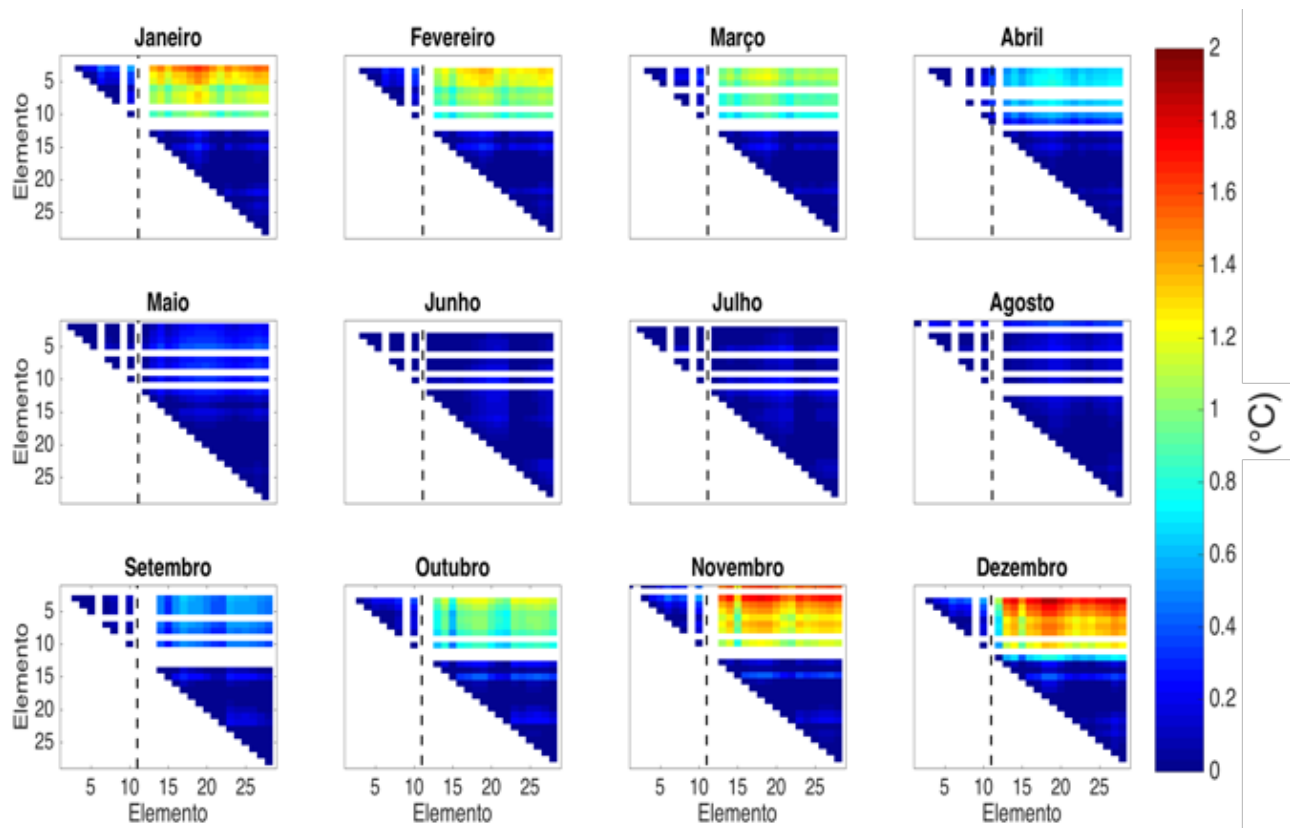


Figura 31. Diferença entre os valores da TSM média mensal entre os elementos da grade para a região. A linha pontilhada delimita a BTS (a esquerda) e a plataforma (a direita).

6 DISCUSSÃO

A aquisição de dados orbitais diários para a BTS através do sensor MODIS-Aqua se mostrou limitada. A pequena disponibilidade de imagens úteis (22 % adquiridas e 17 % utilizadas) foi também observada por Santos (2014) para a região da plataforma continental na costa da Bahia. Apesar do MODIS ter uma ótima resolução espacial e orbitar a BTS diariamente, a grande quantidade de lacunas nos dados limitou sua utilização em investigações da variação espaço-temporal da TSM. Em escalas anuais e mensais, os dados gerados pelo MODIS seguem as tendências de aquecimento e resfriamento da TSM média observada no GOES, porém os valores são sempre mais elevados, o que causa um viés nos resultados, podendo levar a deduções equivocadas do comportamento da variável na região, principalmente em escala anual.

A diferença nos valores de TSM média entre os dois satélites pode ser explicada pela diferença na aquisição de dados dos mesmos. Enquanto os dados do GOES representam a média diária, o satélite MODIS adquire 1 único dado por volta das 16:00 hrs, que, de acordo com Rodrigues (2016), é o horário no qual as temperaturas máximas da água são alcançadas.

Mesmo com uma menor resolução espacial, o satélite GOES pôde gerar uma cobertura praticamente ininterrupta da TSM, e com apenas 60 dias de lacunas nos 16 anos estudados, acabou por fornecer a maior e mais robusta série temporal de TSM para a região da BTS. Todavia, ocorre uma aparente dificuldade de aplicação do algoritmo em regiões costeiras, pois apenas 29 elementos (50 % do total) da grade inicial puderam ser utilizados no estudo.

Quando comparados aos valores médios de temperatura da água coletadas *in situ* para duas estações do trabalho realizado por Rodrigues (2016), os dados de TSM média apresentaram boa concordância. No trabalho realizado por aquele autor, a estação de superfície TS2 a 4 m de profundidade registrou uma temperatura média (2012 a 2015) diferente em 0,3 °C da TSM do GOES. A diferença entre os desvios da temperatura média *in situ* e da TSM do GOES foi de apenas 0,2 °C. Mesmo quando comparado com dados de fundo, a aproximadamente 30 m de profundidade, as diferenças para a TSM média do GOES foram pouco superiores a -0,5 °C e a diferença entre os desvios foi 0,07 °C para a estação TS1 (fundo) e 0,3 °C para a TS2 (fundo) (Tabela 2).

Tabela 2. TSM média e desvio padrão para os anos de 2012 a 2015 das estações TS1 e TS2 (sup) e TS2 (fun) do trabalho de Rodrigues (2016) e TSM média e desvio padrão para os mesmos anos dos elementos 11, 3 e 2 do GOES.

| | TSM MÉDIA | DESVIO PADRÃO |
|-------------------------|-----------|---------------|
| TS1 (FUNDO) | 26,5 | 1,0 |
| ELEMENTO 11 | 27,0 | 0,9 |
| TS2 (FUNDO) | 27,2 | 1,1 |
| ELEMENTO 3 | 27,6 | 1,5 |
| TS2 (SUPERFÍCIE) | 27,5 | 1,3 |
| ELEMENTO 2 | 27,8 | 1,6 |

Entretanto, quando comparado com valores diários de TSM, mesmo havendo correspondência entre as tendências de aquecimento e resfriamento sazonais, o GOES

não foi capaz de detectar quedas bruscas de temperatura aparentemente relacionadas com fenômenos de ressurgência (Figura 32). Com isso, é possível dizer que, de maneira genérica, dados orbitais de temperatura de superfície da água na BTS potencialmente podem ser úteis também para caracterização da coluna d'água até 5 m de profundidade, mas não podem ser utilizados para caracterização da coluna d'água como um todo.

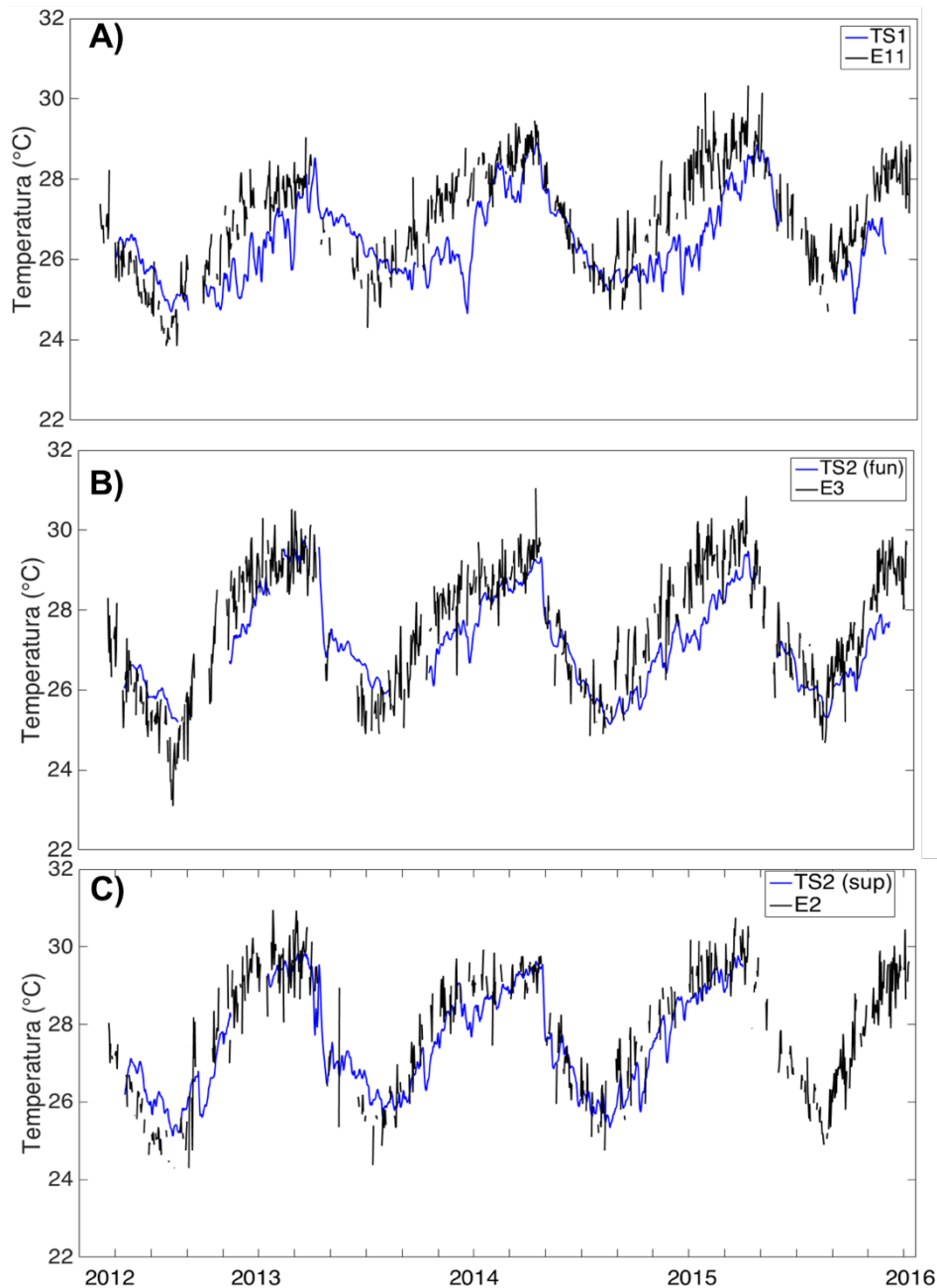


Figura 32. Variação diária da TSM média do GOES e das estações do trabalho realizado por Rodrigues (2016). A) TS1 e elemento 11. B) TS2 (fun) e elemento 3. C) TS2 (sup) e elemento 2.

A temperatura máxima registrada na BTS, de aproximadamente 32 °C, foi maior que as até então reportadas por Cirano e Lessa (2007) (30,5 °C) e Rodrigues (2016) (31,1 °C). A mínima registrada de 22,0 °C ficou abaixo das reportadas pelos mesmos autores, de 24,2 °C e 26,3 °C, respectivamente. A amplitude média de variação anual da TSM entre as duas regiões variou entre 0,4 °C a 1,2 °C, sendo menor que a reportada por Cirano e Lessa (2007) de aproximadamente 1,6 °C.

A região apresenta dois ciclos sazonais bem definidos, como já foi observado por Cirano e Lessa (2007), Rodrigues (2016) e Carvalho e Lentini (2011). Ocorre um aquecimento na baía nos meses de verão (de setembro a dezembro e de janeiro a março - estação seca), e um resfriamento nos meses de inverno (abril a agosto - estação chuvosa). As temperaturas médias máximas são registradas no mês de março para a BTS e em abril para a plataforma, e as mínimas são atingidas em agosto. A variação máxima da TSM dentro da BTS foi 7,8 °C, sendo maior que as até então reportadas por Rodrigues (2016) que variaram entre 4 °C a 6 °C.

Existe um claro gradiente de temperatura entre a BTS e a plataforma continental no verão. Dois importantes fatores podem explicar a existência desse gradiente: a profundidade e o tempo de residência da massa d'água dentro da baía. As áreas mais internas da BTS têm profundidade média variando entre 0 e 10 metros, enquanto que a profundidade da região central da baía varia entre 10 e 30 metros (Cirano e Lessa, 2007). O aquecimento é mais rápido em regiões mais rasas, onde o volume de água é menor. Ainda, o tempo de residência das regiões mais internas da BTS, de até 150 dias (Lessa et al., 2016), potencializa o aquecimento. As diferenças de temperatura média entre a BTS e plataforma podem ser maiores que 1 °C, mas são praticamente nulas no inverno. Segundo Rodrigues (2016), a variabilidade da temperatura média mensal da água na BTS mostra que o início da estação chuvosa (abril) proporciona um aumento da nebulosidade e diminuição da insolação que, somado à redução de radiação oriunda do ciclo solar anual, ocasiona a diminuição da temperatura da água. Em seguida, o início da primavera (setembro) marca o início da intensificação da radiação solar, proporcionando mais horas de exposição solar. Somado à diminuição do aporte pluviométrico no verão, ocorre então a elevação da temperatura da água e aumento do gradiente térmico longitudinal até o final do verão.

As maiores diferenças de temperatura entre a BTS e a plataforma ocorrem em dezembro. Isto está relacionado a um processo de ressurgência costeira que se estabelece na plataforma entre outubro e março, mas com maior intensidade em dezembro (Santos

2014). A ressurgência resfria as águas na região da plataforma enquanto a radiação solar continua atuando no aquecimento das mesmas na baía.

A variabilidade interanual da TSM está de acordo com relatos anteriores. Segundo Santos (2014), o ano de maior ocorrência de eventos de ressurgência na plataforma continental foi 2012. Ainda segundo aquele autor, dados *in situ* (TS1 fundo) apontaram quedas de temperatura na entrada da BTS coincidentes com o evento na plataforma, o que indica que as águas da ressurgência adentraram a região da baía. Os valores médios de TSM registrados pelo GOES na plataforma (25,8 °C) e na BTS (26,8 °C) em 2012 ficaram abaixo da média para os 16 anos, corroborando o que foi sugerido pelo autor.

As maiores diferenças de temperatura entre BTS e plataforma foram nos anos de 2012 e 2013. Rodrigues (2016) observou que o ano hidrológico de 2013 (tem início em abril de 2012 e termina em março de 2013) foi o mais árido dos últimos 30 anos, com baixas taxas de precipitação e elevadas taxas de exposição à radiação solar, o que acarretou em um balanço hídrico negativo, causando hipersalinidade e formando inclusive uma rolha de densidade no canal central da baía no mês de abril. De acordo com Lessa *et al* (2017), situações como essa são potencialmente dramáticas do ponto de vista ambiental pois influenciam diretamente na circulação não-mareal, no tempo de residência da água, na concentração de gases e nutrientes e na biomassa de organismos planctônicos.

O clima tem se tornado progressivamente mais seco nas últimas décadas (Hartmann et al. 2013; Lessa et al 2016), e a descarga de água fluvial vem diminuindo. A partir da década de 1980 o aporte de água fluvial foi ainda mais prejudicado pela construção da barragem de Pedra do Cavalo, que de acordo com Genz e Lessa (2015), comprometeu o aporte de 57,6 ou 17,4 % de água doce para a baía. Segundo Lessa *et al.* (2017), as condições de extrema aridez no ano hidrológico de 2013 servem como referência para o cenário hidrológico que deverá ser mais acentuado e frequente ao longo dos anos. De acordo com Rodrigues (2016), dentre os anos estudados, o ano hidrológico de 2013 foi o que apresentou maior ocorrência de fenômenos de ressurgência, que estão intimamente ligados com a maior frequência de ventos de nordeste. Santos (2014) mostrou que ventos de nordeste foram predominantes em todos os eventos de ressurgência na plataforma continental.

A Figura 33 apresenta a série temporal da velocidade média anual e mensal da componente V do vento (estação do Aeroporto Internacional de Salvador) para os anos de estudo, bem como a diferença de temperatura média anual e mensal entre um

elemento na BTS e um elemento na plataforma. Observa-se a existência de uma relação visual entre incidência de ventos de nordeste e diferença de temperatura, com maior velocidade dos ventos de nordeste (valores negativos) causando aumento na diferença de temperatura entre as duas regiões. A diferença de temperatura aumentou de 2009 a 2013 (chegando a 1,8 °C na diferença anual e aproximadamente 3 °C na diferença mensal), e ocorreu uma diminuição nos anos seguintes. Segundo Rodrigues (2016), os anos hidrológicos de 2014 e 2015 foram mais úmidos e com maior nebulosidade, menor insolação, menor temperatura do ar, menor incidência de ventos de NE, e maior aporte de água pluvial e fluvial na baía. Isso acabou por resultar na diminuição das diferenças de temperatura nos anos de 2014 e 2015.

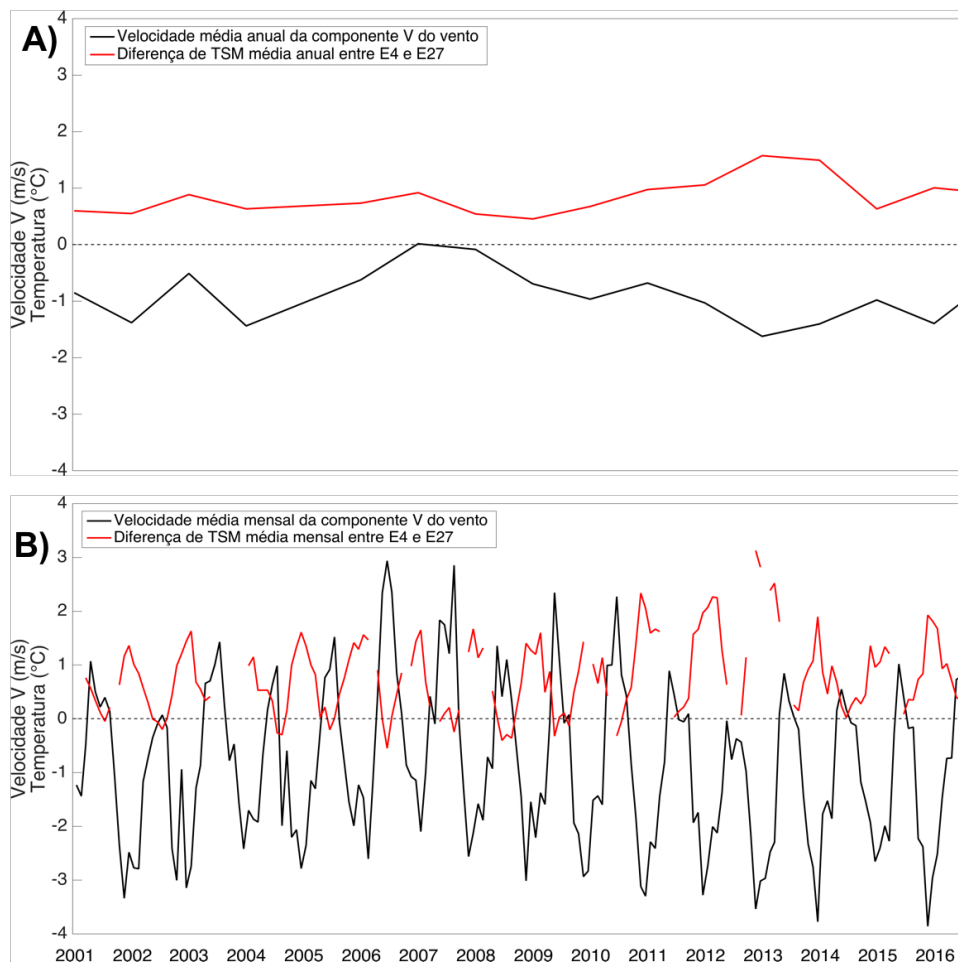


Figura 33. Variação da velocidade do vento (linha preta) e diferença de temperatura entre E4 e E27 (linha vermelha) anual (A) e mensal (B). Valores de velocidade negativos estão relacionados a ventos de nordeste.

O coeficiente de correlação (R^2) calculado entre as diferenças médias de temperatura mensal e a variação mensal da componente V do vento foi -0,4 (Figura 34). A correlação

entre a incidência de ventos de nordeste e diferença de temperatura existe, entretanto, não é considerada como perfeita, mas sim, moderada.

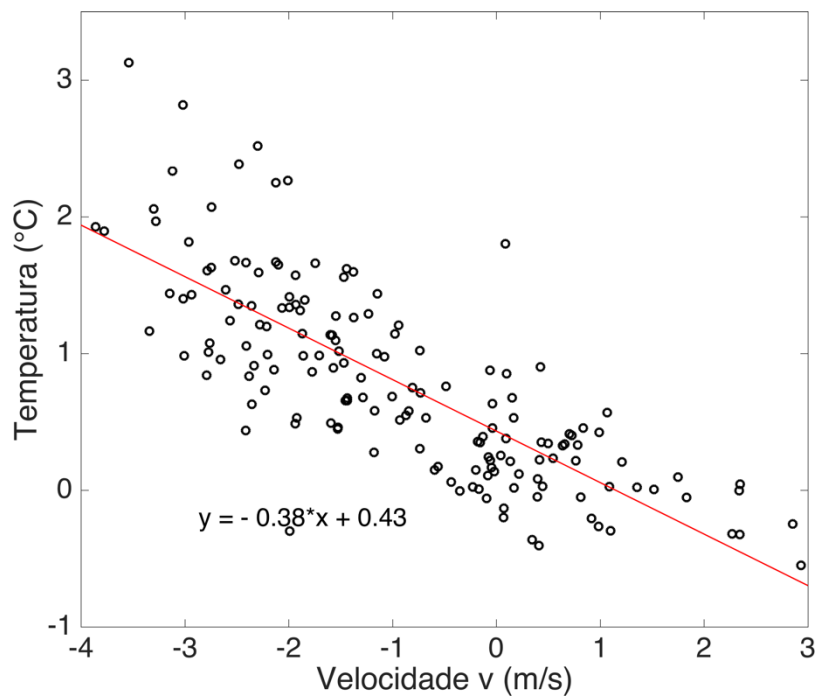


Figura 34. Coeficiente de correlação entre a diferença de temperatura dos elementos 4 (na BTS) e 27 (na plataforma) e a velocidade da componente V do vento. Valores mais negativos de velocidade indicam maior incidência de ventos de nordeste.

7 CONCLUSÃO

O uso do sensoriamento remoto para a aquisição de dados de TSM para a BTS se mostrou limitado. O satélite MODIS-Aqua mostrou baixo aproveitamento de imagens diárias, o que compromete sua utilização para análises em escalas mensais e anuais. Para potencializar a utilização deste satélite no estudo da TSM e outras variáveis geofísicas na BTS sugere-se que haja uma coleta in situ para os mesmos dias e horários de passagem do mesmo. Por outro lado, mesmo apresentando problemas na aplicação do algoritmo em regiões costeiras, o satélite GOES gerou uma série temporal longa e robusta para ser utilizada como referência para futuros estudos oceanográficos.

A temperatura média dos 16 anos de investigação foi 0,8 °C mais quente na BTS (27,2 °C) do que na plataforma (26,4 °C). A TSM na BTS também apresentou maior variabilidade, com desvio padrão máximo anual 0,4 °C acima do desvio observado na

plataforma continental. Ocorre um gradiente de temperatura interno na BTS, que aumenta das regiões mais abrigadas da baía em direção à plataforma continental devido a menor profundidade e o maior tempo de residência das massas d'água nestas regiões.

A BTS e a plataforma sofrem com um ciclo sazonal de resfriamento (abril a agosto) e aquecimento (setembro a março). Existe, entretanto, uma defasagem temporal quanto ao aquecimento da água da BTS em relação à plataforma de um mês (temperaturas médias máximas na BTS são atingidas em março e na plataforma apenas em abril. Nos meses de verão a diferença média de temperatura entre BTS e plataforma são maiores, chegando a um máximo de aproximadamente 2 °C em dezembro.

As variações anuais de temperatura na BTS tiveram um mínimo de 5,6 °C em 2016 e um máximo de 7,8 °C em 2013. Na plataforma as variações foram de 4,4 °C em 2015 a 6,3 °C em 2001. As diferenças inter-anuais de temperatura média entre BTS e plataforma de 2001 a 2008 variaram entre 0,6 °C e 0,8 °C, mas a partir de 2009 observa-se um aumento nessa diferença. Este aumento parece correlacionar-se bem com o aumento da incidência de ventos de nordeste, que também aumentaram nestes mesmos anos, e que estão relacionados ao estabelecimento da ressurgência costeira.

Um ciclo de longo prazo de oscilação da TSM, pode ser o responsável pelo aumento observado da TSM média em toda a região entre os anos de 2013 e 2016. Como esta oscilação ocorre dentro e fora da BTS, sugere-se que esteja relacionada a fenômenos de larga escala. Para melhor investigar o que motivou as variações de temperatura, sugere-se que mais forçantes e suas correlações com a TSM sejam analisadas em futuros estudos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; MEDEIROS, A. F. F.; SEABRA, V. S. Estimativa de turbidez e temperatura da água a partir de dados dos sensores TM e ETM+ para a Baía de Guanabara. In: Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2435 - 2442.

BROWN, O. B., & MINNETT, P. J. (1999). MODIS infrared sea surface temperature algorithm theoretical basis document, version 2.0. (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf).

CARVALHO, R. C.; LENTINI, C. A. D. Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a spatial-temporal variation using MODIS- Aqua in the Todos os Santos Bay, Bahia, Brazil.

In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7176

CHURCHILL, J. H., PETTIGREW, N. R., & SIGNELL, R. P. (2005). Structure and variability of the Western Maine Coastal Current. *Deep Sea Research, Part II*, 52(19–21), 2392–2410. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2005.06.019>

CIOTTI, A.M. Fundamentos de Aplicações de dados bio-ópticos em Oceanografia Biológica. In: SOUZA, R.B. (Org.). *Oceanografia por Satélites*. São Paulo, 2005. p.205-219.

CIRANO, M.; LESSA, G. C. (2007). Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos. Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, p. 363-387.

CUERVO, J. V.; DEWITTE, B.; CHIN, T. M.; ARMSTRONG, E. M.; PURCA, S.; ALBURQUEQUE, E. (2013). An analysis of SST gradients off the Peruvian Coast: The impact of going to higher resolution. *Remote Sensing of Environment* 131 p. 76-84.

DIRK, A. A.; HEIDI, M. D. (2012). Advantages and limitations of ocean color remote sensing in CDOM-dominated, mineral-rich coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment* 125 p. 181–197. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.001>

GENZ F.; LESSA G.C., (2015). Twenty-six years of uneven changes in low flows due to different uses and operation of a large dam in a semiarid river. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 523-532.

GORDON, H. R.; WANG, M. (1994). Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, v. 33, n. 3, p. 443- 452.

HARTMANN. D.L., A.M.G. KLEIN. T, RUSTICUCCI. M, ALEXANDER. L.V., BRÖNNIMANN. S., CHARABI. Y., DENTENER. F.J., DLUGOKENCKY. E.J., EASTERLING. D.R., KAPLAN. A., SODEN. B.J., THORNE. P.W., WILD. M e ZHAI. P.M. (2013). *Observations: Atmosphere and Surface*. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor

KARAGALI, L.; HOYER, J.; HASAGER, C. (2012). SST diurnal variability in the North Sea and the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment* v. 121 p.150-170. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.016>

KILPATRICK, K. A.; PODESTÁ, G.; WALSH, S.; WILLIAMS, E.; HALLIWELL, V.; SZCZODRAK, M.; BROWN, O. B.; MINNETT, P. J.; EVANS, R. (2015). A decade of sea

surface temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment* v.165 p.27-41.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.023>

KNOPPERS, B; EKAU, W.; FIGUEIREDO, A.G. (1999). The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport. *Geo-Marine Letters* v.19, p. 171-178.
<https://doi.org/10.1007/s003670050106>

LESSA, G. C.; CIRANO, M.; TANAJURA, C. A. S.; SILVA, R.R. (2009). Oceanografia Física. In: Vanessa Hatje; Jailson B. de Andrade. (Org.). Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos. Salvador: EDUFBA, v. 1, p. 68-119.

LESSA, G.; MAFALDA, P.; SOUSA, M; GOMES, D.; SAMPAIO, C.; TEIXEIRA, C.; SOUZA, J.; ZUCCHI, M., (2016). Variabilidade intra-anual da oceanografia da baía de todos os santos: evidências de 3 anos de monitoramento, p. 7-10, 30-33.

LI, Y.; HE, R. (2014). Spatial and temporal variability of SST and ocean color in the Gulf of Maine based on cloud-free SST and chlorophyll reconstructions in 2003–2012. *Remote Sensing of Environment* v.144 p.98–108.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.019>

LUERSSSEN, R. M., THOMAS, A.C., & HURST, J. (2005). Relationships between satellite-measured thermal features and *Alexandrium*-imposed toxicity in the Gulf of Maine. *Deep Sea Research, Part II*, 52, 2656–2673. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2005.06.025>

NASCIMENTO, R. F. F (2007). Variabilidade da concentração de clorofila na região costeira de Ubatuba, litoral Norte de São Paulo. 46 f. (Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica). INPE, São José dos Campos, São Paulo. 2007.

REINART, A.; REINHOLD, M. (2008). Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. v.112 p. 603-611.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.015>

RICE. E., DAM. H.G. e STEWART. G., (2015). Impact of Climate Change on Estuarine Zooplankton: Surface Water Warming in Long Island Sound Is Associated with Changes in Copepod Size and Community Structure. *Estuaries and Coasts*, 38(1):13-23

ROCHA, L. S. N. (2015). Calibração dos registros ambientais em esqueletos de colônias do coral *Siderastrea stellata* Verril, 1868. 94 f. Dissertação (Mestre em Geologia marinha, costeira e sedimentar). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

RODRIGUES, R. M. (2016). Análise da variabilidade do campo termohalino e suas forçantes no eixo central da Baía de Todos os Santos. 61 f. Monografia (Bacharelado em Oceanografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

RYAN, J. P., YODER, J. A., & CORNILLON, P. C. (1999). Enhanced chlorophyll at the shelfbreak of the mid-Atlantic Bight and Georges Bank during the spring transition. *Limnology and Oceanography*, 44, 1–11. <http://doi.org/10.4319/lo.1999.44.1.0001>

SANTOS, F. M. (2014). *Ressurgência costeira na Zona de formação da Corrente do Brasil (13°S)*. 48 f. Dissertação (Mestre em Ciências em Geofísica). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SAVTCHENKO, A., OUZOUNOY, D., AHMAD, S., ACKER, J., LEPTOUKH, G., KOZIANA, J., & NICKLESS, D. (2004). Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research*, 34(4), 710–714. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.03.012>

SOARES, J. V.; BATISTA, G. Y. e SHIMABUKURU, Y. E. (2007). O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil. In: Rudorff F. T.; Shimabukuru, Y. E. e CEBALLOS, C. (Org). São José dos Campos, SP. Ed. Parêntese, p:3-22.

THOMAS, A.C., WEATHERBEE, R., XUE, H., & LIU, G. (2010). Interannual variability of shellfish toxicity in the Gulf of Maine: Time and space patterns and links to environmental variability. *Harmful Algae*, 9, 458–480. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2010.03.002>.

VALERIO, L. P.; KAMPEL, M.; GAETA, S. A. Análise comparativa da concentração de clorofila-a estimada pelo sensor MODIS-Aqua e medida in situ no litoral norte de São Paulo: Estação Antares-Ubatuba. In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

APENDICE

| REGIÃO | TSM MÉDIA (°C) | TSM MÁXIMA (°C) | TSM MINIMA (°C) | DESVIO PADRÃO |
|------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| BTS | 27,2 | 32,0 | 22,0 | 1,5 |
| PLATAFORMA | 26,4 | 31,5 | 22,0 | 1,2 |

Tabela 3. Temperatura média, máxima, mínima e desvio padrão para a BTS e para a região da plataforma adjacente ao longo de 16 anos.

| ANO | TSM MÉDIA BTS | TSM MÉDIA PLATAFORMA | TSM MÁXIMA BTS | TSM MÁXIMA PLATAFORMA | TSM MÍNIMA BTS | TSM MÍNIMA PLATAFORMA | DESVIO PADRÃO BTS | DESVIO PADRÃO PLATAFORMA |
|------|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 2001 | 26,7 | 26,2 | 30,5 | 29,1 | 22,6 | 22,8 | 1,5 | 1,2 |
| 2002 | 26,9 | 26,4 | 30,3 | 28,8 | 23,1 | 23,6 | 1,3 | 1,0 |
| 2003 | 27,7 | 26,9 | 31,3 | 30,2 | 24,2 | 24,3 | 1,4 | 1,2 |

| | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 2004 | 26,9 | 26,3 | 30,9 | 29,3 | 22,5 | 23,2 | 1,5 | 1,1 |
| 2005 | 27,0 | 26,4 | 30,7 | 29,2 | 23,0 | 23,8 | 1,4 | 1,1 |
| 2006 | 27,0 | 26,3 | 30,6 | 29,1 | 22,8 | 23,2 | 1,7 | 1,2 |
| 2007 | 26,6 | 26,1 | 30,3 | 29,1 | 23,3 | 23,6 | 1,5 | 1,2 |
| 2008 | 26,7 | 26,1 | 30,2 | 28,7 | 23,3 | 23,6 | 1,6 | 1,1 |
| 2009 | 27,1 | 26,5 | 30,4 | 29,2 | 24,2 | 23,9 | 1,4 | 1,0 |
| 2010 | 27,2 | 26,4 | 30,6 | 29,0 | 23,8 | 23,9 | 1,6 | 1,3 |
| 2011 | 26,7 | 26,0 | 30,3 | 28,5 | 23,8 | 23,8 | 1,5 | 1,1 |
| 2012 | 26,8 | 25,8 | 30,0 | 28,3 | 23,4 | 22,8 | 1,4 | 0,9 |
| 2013 | 27,6 | 26,4 | 30,6 | 28,6 | 24,3 | 22,8 | 1,4 | 0,9 |
| 2014 | 27,6 | 27,0 | 30,5 | 29,2 | 24,2 | 24,6 | 1,4 | 1,1 |
| 2015 | 27,9 | 27,0 | 30,6 | 29,2 | 24,6 | 24,9 | 1,3 | 1,0 |
| 2016 | 28,0 | 27,2 | 30,7 | 29,6 | 24,7 | 25,0 | 1,3 | 1,1 |

Tabela 4. Temperatura média, máxima, mínima e desvio padrão anual para a BTS e para a região da plataforma adjacente.

| MÊS | TSM MÉDIA BTS | TSM MÉDIA PLATAFORMA | TSM MÁXIMA BTS | TSM MÁXIMA PLATAFORMA | TSM MÍNIMA BTS | TSM MÍNIMA PLATAFORMA | DESVIO PADRÃO BTS | DESVIO PADRÃO PLATAFORMA |
|------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| JANEIRO | 28,2 | 27,0 | 30,6 | 29,1 | 25,8 | 25,0 | 0,8 | 0,7 |
| FEVEREIRO | 28,6 | 27,6 | 31,1 | 30,0 | 25,0 | 24,0 | 0,8 | 0,8 |
| MARÇO | 28,8 | 27,8 | 30,9 | 30,1 | 25,5 | 25,2 | 0,8 | 0,8 |
| ABRIL | 28,5 | 27,8 | 30,7 | 29,4 | 25,7 | 25,1 | 0,8 | 0,7 |
| MAIO | 27,2 | 27,0 | 30,5 | 29,2 | 24,3 | 22,6 | 0,9 | 0,8 |
| JUNHO | 26,0 | 25,9 | 29,9 | 28,3 | 23,0 | 23,4 | 1,0 | 0,7 |
| JULHO | 25,3 | 25,2 | 28,4 | 27,6 | 23,0 | 23,0 | 0,9 | 0,6 |
| AGOSTO | 25,2 | 25,1 | 29,4 | 27,3 | 22,3 | 22,9 | 1,0 | 0,6 |
| SETEMBRO | 25,9 | 25,4 | 28,8 | 27,4 | 23,0 | 23,4 | 0,9 | 0,6 |

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| OUTUBRO | 26,8 | 25,8 | 29,3 | 27,8 | 23,9 | 22,7 | 0,8 | 0,6 |
| NOVEMBRO | 27,5 | 26,1 | 30,3 | 28,2 | 24,5 | 23,8 | 0,8 | 0,6 |
| DEZEMBRO | 27,9 | 26,5 | 30,2 | 28,9 | 25,3 | 24,4 | 0,7 | 0,7 |

Tabela 5 . TSM média, máxima, mínima e desvio padrão mensal para a região interna da BTS e para a plataforma continental adjacente.