



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

GAIA TAVARES MACHADO

**ANÁLISE HARMÔNICA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO MAR NO
OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL A PARTIR DE IMAGENS AVHRR/NOAA.**

FORTALEZA

2012

GAIA TAVARES MACHADO

**ANÁLISE HARMÔNICA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO MAR NO
ATLÂNTICO EQUATORIAL A PARTIR DE IMAGENS AVHRR/NOAA.**

**Monografia apresentada
junto ao curso de
Oceanografia do Instituto de
Ciências do Mar da
Universidade Federal do
Ceará, na área de
Oceanografia Física, como
requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em
Oceanografia.**

Orientador: Prof. Dr. Carlos
Eduardo Peres Teixeira

Biblioteca Rui Simões de Menezes
Universidade Federal do Ceará
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M131a
Machado, Gaia Tavares
Análise harmônica da temperatura superficial do mar no Oceano Atlântico
Equatorial a partir de imagens AVHRR/NOAA \ Gaia Tavares Machado. – 2013.
58 f. : il. color. enc. : 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do
Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. AVHRRs. 2. Sensores. 3. Atlântico, Oceano. I. Título.

FORTALEZA

2012

CDD 621.361

GAIA TAVARES MACHADO

**ANÁLISE HARMÔNICA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO MAR NO
ATLÂNTICO EQUATORIAL A PARTIR DE IMAGENS AVHRR/NOAA.**

**Monografia apresentada
junto ao curso de
Oceanografia do Instituto de
Ciências do Mar da
Universidade Federal do
Ceará, na área de
Oceanografia Física, como
requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em
Oceanografia.**

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Prof. Ms. Antonio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Jacques Maurice René Raymond Servain
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

"Porque algum dia é preciso parar
de sonhar, tirar os planos das gavetas
e de algum modo começar."

Amyr Klink

AGRADECIMENTOS

Gratidão à Deus, em primeiro lugar, pela oportunidade da vida, por estar realizando esse trabalho e concluindo o curso de Oceanografia.

Gratidão aos meus pais, Marco e Mércia, pelo apoio de sempre, pelos conselhos e pela amizade. Às minhas irmãs Mira, Deneb, Naime e Maria e ao meu irmão Tiuaço pela companhia e amizade.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira por toda paciência, ajuda e orientação que foram essenciais para a realização desse trabalho.

Aos meus amigos de curso, em especial, Évila, Wersângela, Bárbara, Felipe, Heitor e Gabi, e aos colegas da turma de 2009, por toda a convivência durante esses quatro anos de estudo, os quais tornaram essa jornada mais divertida.

E a todos os professores e funcionários do Instituto de Ciências do Mar – Labomar, pela dedicação e por todos os anos de convivência.

RESUMO

Neste estudo, foram utilizados 29 anos de dados de temperatura da superfície do mar (TSM), do tipo AVHRR, com resolução espacial de 4 km, do tipo "AVHRR Pathfinder Best SST" versão 5.2 (PFV5.2) para estudar a variabilidade temporal de TSM no Oceano Atlântico Sul Equatorial (ASE) (5° S a 4° N e 41 a 35° W). Em primeiro lugar, foi avaliada a cobertura de nuvens e os sinais determinísticos anuais e semi-anuais através de análise harmônica. O ciclo anual e o semi-anual foram removidos a partir dos dados originais e um filtro passa-baixo foi utilizado para estimar a contribuição do componente inter-anual. Finalmente, o sinal inter-anual também foi removido e a variância associada aos resíduos restantes foi calculada para tratar a componente intra-anual. Mostra-se que a região é coberta por nuvens com dados de TSM indisponível entre 40% e 60% do tempo. O sinal anual explica a maioria das variações sobre a área com um coeficiente de determinação superior a 70% e amplitudes que variam de 1 ° a 1,5 ° C e aumentam para o leste e para a costa. A fase do ciclo anual apresenta valores entre 40 e 60 dias em relação ao 01 de janeiro, ocorrendo mais cedo sobre a plataforma continental leste. Os sinais do ciclo semi-anual apresentam amplitudes pequenas de aproximadamente 0,5 ° C na maior parte da região e decresce para regiões *offshore*. A amplitude do ciclo semi-anual é em geral três vezes menor do que o ciclo anual. A plataforma continental, em geral, apresenta variabilidade inter-anual fraca com valores de variância em cerca de 0,2 ° C. Após removidos os sinais anuais e semi-anuais, o sinal de inter-anual explica 60 a 70% da variabilidade residual dos dados. A variabilidade intra-anual apresenta valores de variação entre 0,2 e 0,3 ° C, e explica a maior parte da variabilidade residual. Tanto a variabilidade inter e intra-anual de TSM no ASE é espacialmente homogênea. Pela primeira vez a variabilidade temporal da TSM variando de Sub-sazonal a inter-anual foi abordada na região do ASE. À luz dos resultados, demonstrou-se que a TSM no ASE apresenta uma pequena variabilidade temporal e espacial. A maior parte da TSM é explicada pelo ciclo anual seguido pelas variações intra-anuais.

Palavras-chave: AVHRR, Análise harmônica, Oceano Atlântico Equatorial.

ABSTRACT

In this study, we used 29 years of daily 4-km AVHRR Pathfinder Version 5.2 (PFV5.2) data to study the SST temporal variability in the Southwestern Tropical Atlantic Ocean (5° S to 4° N and 41 to 35° W). Firstly, we evaluated the cloud cover and assessed the annual and semi-annual deterministic signals using a harmonic analysis. The annual plus the semi-annual cycles were removed from the original data and a low-pass filter was used to estimate the contribution of the inter-annual component. Finally, the inter-annual signal was also removed and the variance associated to the remaining residuals was calculated to address the intra-annual component. We show that the region is covered by clouds – and SST data unavailable – between 40% and 60% of the time. The annual signal explains most of the variability over the area with a coefficient of determination higher than 70% and amplitudes ranging from 1° to 1.5°C . The amplitudes increase eastwards and towards the coast. The phase of the annual cycle presents values between 40 and 60 days with respect to the 1st of January, occurring earlier over the eastern continental shelf. The semi-annual signals present amplitudes close 0.5°C in most of the region decreasing towards offshore regions. The continental shelf as whole, experienced weak inter-annual variability with variance values around 0.2°C . After the annual and semi-annual signals were removed, the inter-annual signal explains 60-70% of the residual. The intra-annual variability presents variance values between 0.2 and 0.3°C and explains most of the residual variability. Both inter and intra-annual SST variability in the SWTA is spatially homogenous. For the first time, the SST temporal variability ranging from sub-seasonal to inter-annual was addressed in the SWTA. In light of the results, we have showed that the SST in the Tropical Southwest Atlantic presents a small temporal and spatial variability. Most of the SST is explained by the annual cycle followed by the intra-annual variations.

Keywords: *AHVRR, Harmonic Analysis, Equatorial Southwest Atlantic.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Mapa esquemático descrevendo a circulação do Oceano Atlântico Equatorial	13
Figura 02 – Circulação do Oceano Atlântico Sul.....	14
Figura 03 - Média de TSM do anos 1982 a 2010	24
Figura 04 - Desvio Padrão de TSM do ano 1982 a 2010.....	25
Figura 05 – a) Porcentagem de dados válidos de TSM do anos 1982 a 2010 b) Variação sazonal da média espacial das porcentagem de dados válidos para toda a região de estudo.....	26
Figura 06 – Médias e porcentagem de dados válidos para os meses de Janeiro a março de todos os anos.....	28
Figura 07 - Médias e porcentagem de dados válidos para os meses de Abril a Junho de todos os anos.....	29
Figura 08 - Médias e porcentagem de dados válidos para os meses de Julho a Setembro de todos os anos.....	30
Figura 09 - Médias e porcentagem de dados válidos para os meses de Outubro a Dezembro de todos os anos.....	31
Figura 10 – Valores deTSM derivados de dados “Pathfinder” (pontos) e o ciclo anual ajustado (curva). Ponto 1.....	33
Figura 11 – Valores deTSM derivados de dados “Pathfinder” (pontos) e o ciclo anual ajustado (curva). Ponto 8.....	33
Figura 12 – Valores deTSM derivados de dados “Pathfinder” (pontos) e o ciclo anual ajustado (curva). Ponto 10.....	34
Figura 13 – Amplitude do Ciclo Anual (°C).....	38
Figura 14 – R2 do Ciclo Anual (%).....	34

Figura 15 – Fase do Ciclo Anual (dias).....	40
Figura 16 – Amplitude do Ciclo Semi-Anual (°C).....	41
Figura 17 – R2 do Ciclo Semi-Anual (%).....	42
Figura 18 – Variância Inter-anual (%).....	44
Figura 19 - R² Inter-anual (%).....	45
Figura 20 – Variância Intra-anual (°C²).....	46
Figura 21 - Séries temporais da variabilidade não determinística dos dados de TSM para o ponto 1.....	49
Figura 22 - Séries temporais da variabilidade não determinística dos dados de TSM para o ponto 3.....	50
Figura 23 - Séries temporais da variabilidade não determinística dos dados de TSM para o ponto 9.....	51
Figura 24 - Séries temporais da variabilidade não determinística dos dados de TSM para o ponto 11.....	52
Figura 25 - Média, desvio padrão e % de dados válidos no ano de 1991.....	54
Figura 26 - Média, desvio padrão e % de dados válidos no ano de 1992.....	54
Figura 27 - Média, desvio padrão e % de dados válidos no ano de 2010.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização dos Pontos usado nas análises posteriores..... 20

Tabela 2 - Resumo dos resultados para os pontos P1,P3,P7, P9 e P11..... 35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Introdução.....	11
1.2 Área de estudo.....	13
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivo Específico.....	17
3. MATERIAS E MÉTODOS.....	18
3.1 Base de dados.....	18
3.2 Tratamento inicial: Média, Desvio Padrão e quantidade de dados válidos.....	19
3.3 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-anual.....	20
3.4 Caracterização da Variabilidade Inter-anual.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1 Média, Desvio padrão e quantidade de Dados Válidos.....	23
4.2 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-anual.....	32
4.3 Caracterização da Variabilidade Inter e Intra-Anual.....	43
4.4 Resíduo não determinístico.....	47
5. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

CAPÍTULO1: INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

O Brasil possui um litoral com aproximadamente 8.000 km de extensão, sendo esta uma região de grande importância ecológica, econômica e social. Entretanto, apesar do seu valor para as populações, há escassez de conhecimento sobre os processos dinâmicos que ocorrem na região oceânica adjacente à costa brasileira. A região do Oceano Atlântico Sul Equatorial (ASE), ainda é pouco estudada, quando comparada, principalmente, com o norte do Oceano Atlântico, assim é necessário realizar um maior aprofundamento nas pesquisas oceanográficas pra melhor compreender a dinâmica nessa área.

A temperatura da superfície do mar (TSM) é um parâmetro de fundamental importância para o entendimento da dinâmica dos oceanos, devido seu impacto na estabilidade da coluna d'água e na atmosfera, através dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera, e é a principal variável física associada às condições climáticas anômalas em várias áreas do globo, sendo indispensável para o acompanhamento de eventos climáticos como o El Niño - Oscilação Sul (ENSO) (FREITAS; KAMPBEL, 2010). Os dados de TSM também são utilizados para identificar gradientes que são úteis em atividades pesqueiras, funcionando como indicador na distribuição de várias espécies marinhas, assim como em monitoramento da saúde de corais. A TSM está relacionada com fenômenos como ressurgência, processos de meso-escala (vórtices, anéis e meandros), frentes oceânicas, advecção e intensidade da radiação solar. Assim o conhecimento da distribuição da TSM pode ser utilizado como traçador destes processos oceanográficos que apresentam assinatura térmica.

Na região oceânica equatorial a oeste do Oceano Atlântico, a TSM é uma variável fundamental para se entender os padrões da precipitação sobre o nordeste do Brasil, que tem sido fortemente relacionada às anomalias de TSM (ATSM), esta interfere sensivelmente no posicionamento e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (ANDREOLI *et al*, 2004). A ZCIT exerce forte influência sobre a precipitação no Nordeste do Brasil, ocasionando anos chuvosos, quando está

posicionada mais ao sul do equador, podendo atingir até 5° a 6° de latitude sul, ou ocasionando anos secos, quando está posicionada mais ao norte do equador.

A variabilidade dos campos de TSM ocorre ao longo de ampla escala espacial e temporal e é controlada principalmente pela distribuição sazonal da radiação solar. O regime de ventos sobre o oceano, vazão do rio e as correntes oceânicas também influenciam significativamente a variabilidade no campo de TSM (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

A incidência da radiação solar sobre a superfície oceânica gera um padrão meridional na distribuição da TSM, a qual é modificada, de acordo com Leite *et al.* (2011) pelas correntes de larga escala na região das bordas continentais.

O estudo da TSM é de grande importância para a compreensão da variabilidade das condições climáticas tanto regionais quanto globais. No Oceano Atlântico Equatorial há grande escassez de dados *in situ*, devido ao alto custo e/ou dificuldades na aquisição dos dados, assim a variabilidade da TSM nessa região não é bem compreendida.

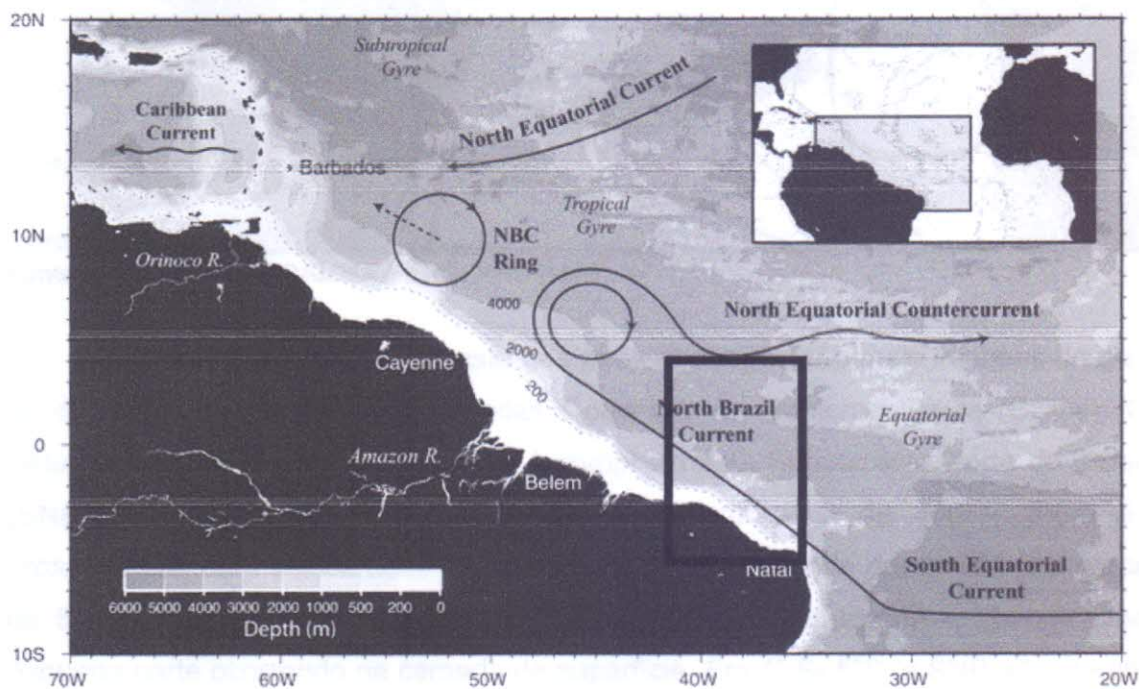
Dada a importância dessa região para o clima regional, outros meios podem ser utilizados para avaliar temporal e espacialmente a variabilidade da TSM. Um desses meios consiste em medições obtidas a partir de sensores remotos orbitais, que permitem avaliar os campos de TSM em grandes escalas espaciais e temporais. O Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) é um exemplo desses sensores. Ele está a bordo dos satélites de órbita polar NOAA-n e mede a radiância emitida (refletida) pela superfície da terra/oceano em comprimentos de onda na faixa do infravermelho termal. As medições obtidas a partir do AVHRR são afetadas pela presença de nuvens e aerossóis na atmosfera, o que pode gerar erros na medição da TSM, sendo utilizados então algoritmos para detectar e minimizar esses efeitos.

Neste trabalho utilizou-se 29 anos de dados de AVHRR para estudar a variabilidade espaço-temporal da TSM na região do Oceano Atlântico Equatorial. O presente trabalho é uma extensão do trabalho de Teixeira, 2003 e 2009, para a região do ASE. O trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 1 é apresentada uma introdução geral sobre o trabalho e a descrição da área de estudo. No capítulo 2 são apresentados os objetivos do estudo. No capítulo 3 são mostrados os materiais e métodos, onde é feita a descrição da base de dados utilizada e do procedimento de processamento das imagens. No Capítulo 4, são apresentados os

resultados do estudo e a discussão dos mesmos, é mostrada a análise harmônica, onde é feita a caracterização dos ciclos anual, semi-anual, inter-anual, intra-anual e apresentada a variância do ciclo inter-anual e intra-anual. As conclusões gerais sobre este estudo são apresentadas no Capítulo 5.

1.2. Área de estudo

Figura 01 - Mapa esquemático descrevendo a circulação do Oceano Atlântico Equatorial, com a Corrente Sul Equatorial (CSE), a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Contracorrente Norte Equatorial (CNE), que fecha o giro Equatorial. A área destacada pelo quadro negro corresponde à região estudada.

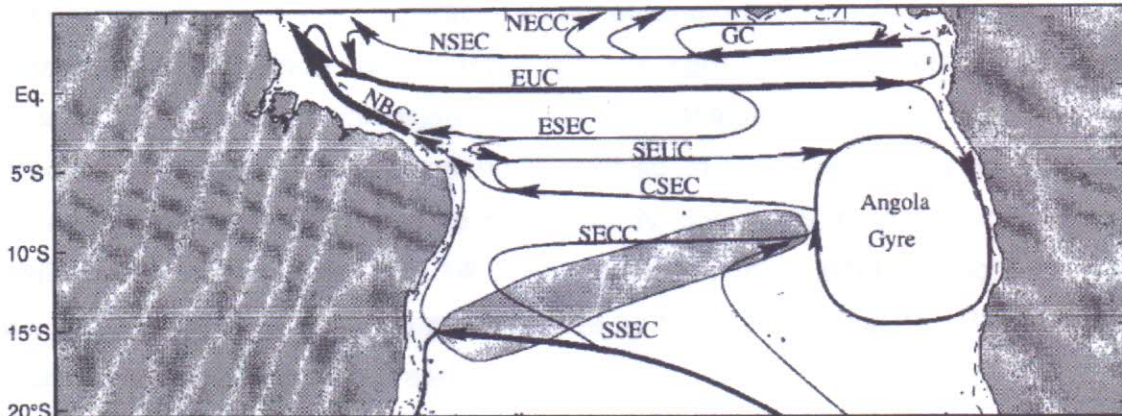


Fonte: Adaptado de FRATANTONI e GLICKSON, (2001).

A Figura 01 apresenta uma porção do Oceano Atlântico Equatorial, mostrando a circulação geral e a batimetria da região. A área de estudo do presente trabalho corresponde à região destacada do oceano Atlântico Equatorial entre 5° S-4° N e 35° W-41° W, localizada na Margem Equatorial Atlântica. Essa área encontra-se sob influência direta da Corrente Norte do Brasil (CNB) (figura 2), a qual se origina a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE) que faz parte do Giro Subtropical do Atlântico Sul. A CSE transporta Água Central do Atlântico Subtropical (ACAS), a qual é quente e salgada, da região de Benguela em direção à região da

plataforma do Brasil, onde se bifurca por volta de 14° S, indo para o norte através da CNB e para o sul através da Corrente do Brasil. Estudos sugerem que a bifurcação da CSE ocorre a 14° - 16° S na camada superficial (0-100 m), no entanto, a determinação da latitude em que ocorre a bifurcação da CSE ainda não é bem definida para o Atlântico Sul (RODRIGUES; ROTHSTEIN; WIMBUSH, 2007).

Figura 02 - Circulação do Oceano Atlântico Sul.



Fonte: Adaptado de STRAMMA e ENGLAND (1999).

As correntes do lado oeste dos giros oceânicos são mais intensas do que as do lado leste, e são denominadas Correntes de Contorno Oeste (CCOs). O sistema das CCOs do giro equatorial é composto pela Subcorrente Norte do Brasil (SNB) e pela CNB. A SNB apresenta núcleo em cerca de 150 – 200m de profundidade, com velocidades de até 90cm s^{-1} , e se estende desde 20° S a cerca de 5° S, com a maior parte do transporte contida na termoclina e apenas uma pequena parte ocorrendo na camada de superfície. Em 4° S- 5°S, a SNB adquire um núcleo de superfície, passando a ser denominada de Corrente Norte do Brasil, quando essa corrente aumenta seu transporte devido, predominantemente, ao aporte adicional de água para a superfície a partir da CSE. A CNB cruza o equador como a maior fonte de água quente transferida do hemisfério Sul para o hemisfério Norte (MARIN, 2009).

De acordo com Marin (2009) na região onde se origina a CNB, a partir da bifurcação da CSE, há presença de grandes anéis de meso-escala, os quais se localizam entre 6° S e 9° N. O mesmo autor defende a presença de um vórtice ou meandro de mesoescala localizado na longitude da cidade de Macau no Rio Grande do Norte (RN), o qual denominou Vórtice de Macau, especulando ser uma estrutura

quase permanente nessa região, como resposta à inércia da CNB e uma tentativa de conservação da vorticidade após a abrupta mudança de orientação de costa no Cabo Calcanhar (RN). Fratantoni e Glickson (2001) descrevem a formação de 14 anéis na CNB durante um período de 3 anos, no entanto, a formação dos anéis descrita por estes autores ocorrem a oeste de 55°W, ou seja, fora da área de estudada.

A área estudada sofre grande influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT é caracterizada por uma banda de intensa nebulosidade associada à confluência dos ventos Alísios de nordeste e dos ventos Alísios de sudeste. Sua posição e intensidade no Oceano Atlântico Equatorial é de extrema importância na determinação do período chuvoso da região semi-árida do Nordeste. A posição média da ZCIT é entre 5° N e 10° N, porém ocorre a migração de sua posição mais ao norte, cerca de 14° N em agosto-setembro, para a posição mais ao sul, cerca de 4° S, durante março-abril onde na faixa longitudinal 40 - 32,5° W está sobre parte do Nordeste do Brasil.

Há uma dependência direta da ZCIT em relação ao aquecimento da superfície do mar, pois a ZCIT está sempre mais próxima do hemisfério que se encontra na época de verão. Na escala planetária, a ZCIT está localizada no ramo ascendente da célula de Hadley, atuando no sentido de transferir calor e umidade dos níveis inferiores da atmosfera das regiões tropicais para os níveis superiores da troposfera e para as médias e altas latitudes.

Um dos padrões de anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical é referido na literatura como Dipolo do Atlântico, onde anomalias de TSM ocorrem com sinais opostos ao norte e ao sul do equador sobre o Atlântico Tropical. Esse padrão de anomalias de TSM gera a ocorrência de gradientes meridionais de anomalias de TSM, que impactam fortemente na posição latitudinal da ZCIT. As variações na TSM têm consequências climáticas em diversas regiões da África e América. Quando a região norte da bacia se encontra mais quente que ao sul, a ZCIT se posiciona mais ao norte de sua posição normal, ocasionando secas na região Nordeste do Brasil e fortes chuvas na região do Sahel, na África. Quando a ZCIT localiza-se mais ao sul, as águas ao sul da bacia se encontram mais quentes que ao norte, ocasionando chuvas na região Nordeste do Brasil e secas na região do Sahel (CLAUZET, WAINER, SERVAIN, 2005).

CAPÍTULO A plataforma continental da região Nordeste Oriental do Brasil na área estudada corresponde ao litoral de todo o estado do Ceará e parte do litoral do estado do Rio Grande do Norte. A plataforma continental nessa região apresenta pouca declividade, com 1:670 a 1:1000 até 70 m de profundidade e largura variando de 100 km no extremo oeste a 40 km no extremo leste (LACERDA; MARINS,2006). A região possui um sistema de meso-marés e é forçada por ventos alísios NE durante o verão e por ventos alísios SE no inverno.

Vários estudos têm investigado a variabilidade dos ciclos anuais e inter anuais da TSM da região do ASE (ex.: Carton e Zhou, 1997, DeWitt e Schneider, 2006), a maior parte destes estudos utiliza modelos numéricos ou dados de baixa resolução para abordar a importância da TSM no ASE em relação ao clima. No entanto, não há estudos anteriores usando dados AVHRR de alta resolução nem que abordam a variabilidade de TSM na plataforma continental na região do ASE.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral:

O presente trabalho tem como objetivo principal estimar a variabilidade espaço-temporal da temperatura da superfície do mar para o oceano Atlântico Equatorial [5°S-4°N e 35°W-41°W], respectivo ao período entre 1981 e 2010, através de imagens obtidas pelo sensor AVHRR a bordo dos satélites da série NOAA.

2.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar os ciclos anual e semi-anual da TSM;
- Caracterizar a variabilidade inter-anual;
- Identificar os padrões de variabilidade intra-anual;
- Inferir e discutir sobre as principais estruturas oceanográficas associadas aos diversos padrões de TSM na área de estudo.

CAPITULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Base de dados:

O NOAA *National Oceanographic Data Center* (NODC) disponibiliza para domínio público (<http://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/pathfinder4km/>) uma grande variedade de produtos orbitais de TSM. Para este trabalho foram utilizados dados de TSM com média de 5 dias, com resolução espacial de 4Km, do tipo "AVHRR *Pathfinder best SST 5.2*" que são derivados de imagens GAC (Global Area Coverage) coletados através do sensor AVHRR o qual está a bordo dos satélites da série TIROS-N da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

O projeto *Pathfinder* é desenvolvido conjuntamente pela NOAA e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), com parceria da *Miami's Rosenthal School of Marine and Atmospheric Sciences* e mantém o banco de dados mais completo sobre as estimativas globais de TSM do sensor AVHRR.

A versão atual dos dados "*Pathfinder Best Sea Surface Temperature*" (BSST5.2) fornece um conjunto de dados com melhor resolução do que as versões anteriores. Como descrito em Casey *et al.* (2010), essa nova versão apresenta melhorias na precisão e na resolução espacial do banco de dados de TSM, formando um conjunto de medidas de TSM derivadas de um processo de interpolação espacial. Neste processo utilizam-se apenas os pixels com menor contaminação, onde a minimização de nuvens e aerossóis é feita com a utilização de um algoritmo, o qual realiza vários testes e comparações, atribuindo notas (flags) para cada pixel, que variam de zero (maior contaminação) até sete (menor contaminação). Somente pixels com nota superior a três são considerados em nossas análises, os demais são caracterizados como lacunas.

Na construção das imagens o algoritmo também detecta diferenças na temperatura entre pixels adjacentes espacialmente (três pixels) e temporalmente (15 dias). Se a diferença for maior do que 2° C, o pixel recebe um "flag" igual a zero, sendo caracterizada como contaminado por nuvem e descartado. Em regiões que apresentam variabilidade espacial maior que 2° C, num pequeno espaço (menor que 12 Km), como em frentes oceânicas, ou que apresentam uma variabilidade maior

que 2° C em frequências maiores que quinze dias, são introduzidas lacunas que não necessariamente se devem à presença de nuvens.

Apesar de produzir grande quantidade de lacunas, o algoritmo Pathfinder apresenta claras vantagens para a análise da TSM quando comparado com outros métodos: as imagens apresentam pouca contaminação de nuvens, precisão de 0,1 ° C e um RMS de 0,94 ° C (Casey et al, 2010).

Os dados utilizados neste trabalho são relativos ao período de novembro de 1981 a dezembro de 2010 (vinte e nove anos). Foram utilizados apenas os dados noturnos de TSM (órbita descendente do satélite), pois não era necessário para o estudo visualizar o efeito diário do aquecimento do oceano.

3.2 Tratamento inicial: Média, Desvio Padrão e quantidade de dados válidos.

Através do NODC foram obtidos os dados utilizados neste estudo em formato HDF STD (Hierarchical Data Format Scientific dataset). Como primeira etapa da análise dos dados, realizou-se a conversão dos dados originais para o ambiente Matlab®. Foram utilizadas 2119 imagens correspondentes aos 29 anos de dados médios de cinco dias. Inicialmente foram construídos mapas com a média, o desvio padrão e a porcentagem de dados válidos (razão lacunas - dados totais) para todo o período de cada série temporal.

Foram escolhidos doze pontos, os quais foram posicionados em diferentes feições oceanográficas, a partir dos quais se extraiu as séries temporais que serão utilizadas para várias análises ao longo do trabalho.

Tabela 01 - Localização dos Pontos usados nas análises posteriores.

Ponto	Latitude	Longitude
1	35.5° W	4.9° S
2	36.8° W	4.8° S
3	37.9° W	4.1° S
4	41.1° W	2.7° S
5	35.5° W	4.3° S
6	36.8° W	3.9° S
7	37.9° W	2.8° S
8	41.1° W	1.5° S
9	35.5° W	0.3° S
10	41.1° W	0.8° N
11	35.5° W	4.1° N
12	41.1° W	4.1° N

Fonte: a autora.

3.3. Caracterização do Ciclo Anual e Semi-anual:

A partir dos dados originais foram extraídas séries temporais para cada pixel da imagem, as quais foram analisadas separadamente. Em cada uma das séries foi realizada a análise dos harmônicos anual e semi-anual utilizando-se o método de mínimos quadrados (EMERY; THOMSON, 1998), através da equação:

$$x(t_n) = \bar{X} + \sum_{q=1}^M C_q \cos[(2\pi/T)(t_n) - \phi_q] + x_r(t_n) \quad \text{(Eq. 1)}$$

Onde o termo $x(t_n)$ é a TSM medida num tempo t_n , \bar{X} a média temporal de x , C_q e ϕ_q são a amplitude e a fase para um harmônico com período T , e $x_r(t_n)$ o resíduo. Este resíduo é constituído pelos outros sinais periódicos não detectados e pelo ruído de amostragem. Os tempos t_n variam de 1 (primeiro dia de amostragem) a 2119 (último dia de amostragem). Foram analisados dois harmônicos, um correspondente ao ciclo anual ($T=365,25$ dias) e outro correspondente ao ciclo semi-

anual ($T=365,25 / 2$ dias). Com base em estudos anteriores na região do Atlântico Sudoeste (ASO), dois modelos são inicialmente ajustados ao conjunto de dados original para capturar a parte determinística da variabilidade temporal da TSM. O primeiro modelo corresponde ao ajuste dos harmônicos anuais (T anual = 365,25 dias). No segundo modelo, os harmônicos anuais e semi-anuais estão incluídos (T anual = 365,25 + T semi-anual = 182,62 dias).

Com os coeficientes dos harmônicos calculados ($Cq, \theta q$), construíram-se os mapas de amplitudes e fase dos ciclos anual e semi-anual para região do ASE.

Foi calculado o coeficiente de determinação (R^2) entre o dado original de TSM; o ciclo anual apenas (equação 1) e o dado original; e os ciclos anual mais semi-anual para cada série, através da equação:

$$r^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde \hat{y}_i é o valor ajustado no instante i , \bar{y} a média dos dados e y_i é o valor original no instante i .

Construiu-se um mapa sintético de R^2 , escalado entre 0 (mínima correlação) e 1 (máxima correlação), e esses valores foram expressos em porcentagem.

O coeficiente de determinação nos fornece a quantidade da variância total da TSM que é explicada pelo modelo representado pela equação 1.

A metodologia acima foi aplicada com sucesso para as regiões do ASO (Teixeira, 2009; Lentini, 2000), no entanto, com base na revisão bibliográfica realizada para esse estudo, essa metodologia nunca foi aplicada à região do ASE.

3.4. Caracterização da Variabilidade Inter-anual e intra-anual:

A contribuição inter-anual para a variabilidade total da TSM foi encontrada inicialmente removendo-se a parte determinista (ciclo anual mais semi-anual) dos dados originais de TSM. Estes resíduos (R1) foram filtrados utilizando um filtro de médias móveis com uma janela de 365 dias, a fim de isolar o sinal com frequências superiores a um ano. A variância da série filtrada foi então usada como uma estimativa da amplitude da variabilidade interanual da TSM. O coeficiente de determinação (R^2) entre o resíduo R1 e os dados filtrados foi encontrado para estimar o quanto da variância do R1 é explicada pela variabilidade inter-anual da TSM.

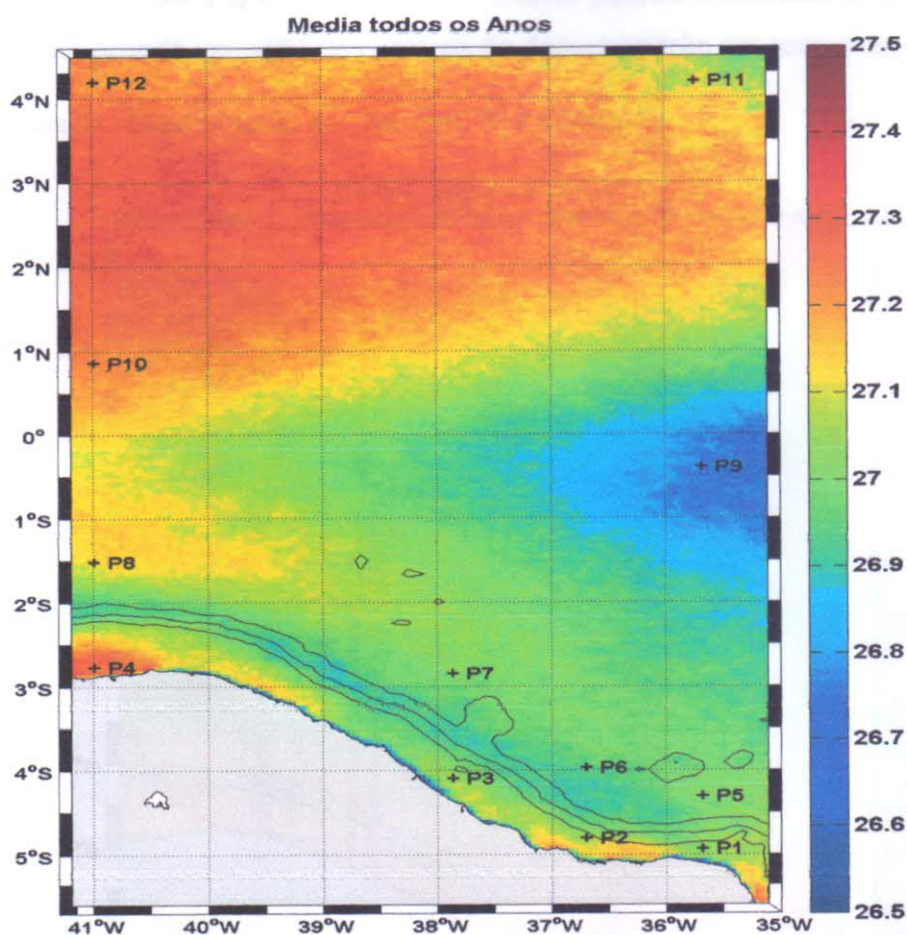
Finalmente, a contribuição inter-anual também foi removida dos dados residuais (R1). O sinal restante (R2) agora contém a variabilidade intra-anual mais o ruído de amostragem. A variância do resíduo R2 é uma estimativa da variabilidade de TSM devido aos processos intra-aneais.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Média, Desvio padrão e quantidade de Dados Válidos:

A partir do mapa de temperaturas médias de 29 anos apresentado na figura 03, pode-se distinguir a plataforma continental, onde os valores de TSM são superiores a 27° C. A assinatura térmica da CNB é marcada por temperaturas relativamente baixas observadas ao longo do talude continental, com valores de TSM em aproximadamente 26,7° C. As médias aumentam em direção ao noroeste do domínio a partir do Equador. A diferença espacial em relação à máxima e mínima média de TSM é apenas 1° C. Essa diferença encontrada para o ASE é muito pequena quando comparada com os resultados de Teixeira *et al.* (2009) para o ASO, onde as médias de temperatura variam de 1° C à 29° C. Essa grande variação espacial no ASO permite caracterizar eventos oceanográficos utilizando dados de TSM, como a assinatura térmica da Corrente do Brasil (CB), que transporta água com temperaturas maiores que 23° C, e da Corrente Malvinas (CM), que transporta água com temperaturas menores que 7° C. No ASE, embora seja possível ver a assinatura térmica da CNB, o gradiente de temperatura entre a CNB e a plataforma continental é menor que 0,5° C. Esse gradiente muito pequeno gera dificuldades na caracterização de outros eventos oceanográficos utilizando a TSM que ocorram com menor gradiente de temperatura.

Figura 03 - Média da TSM (°C) entre 1982 e 2010.

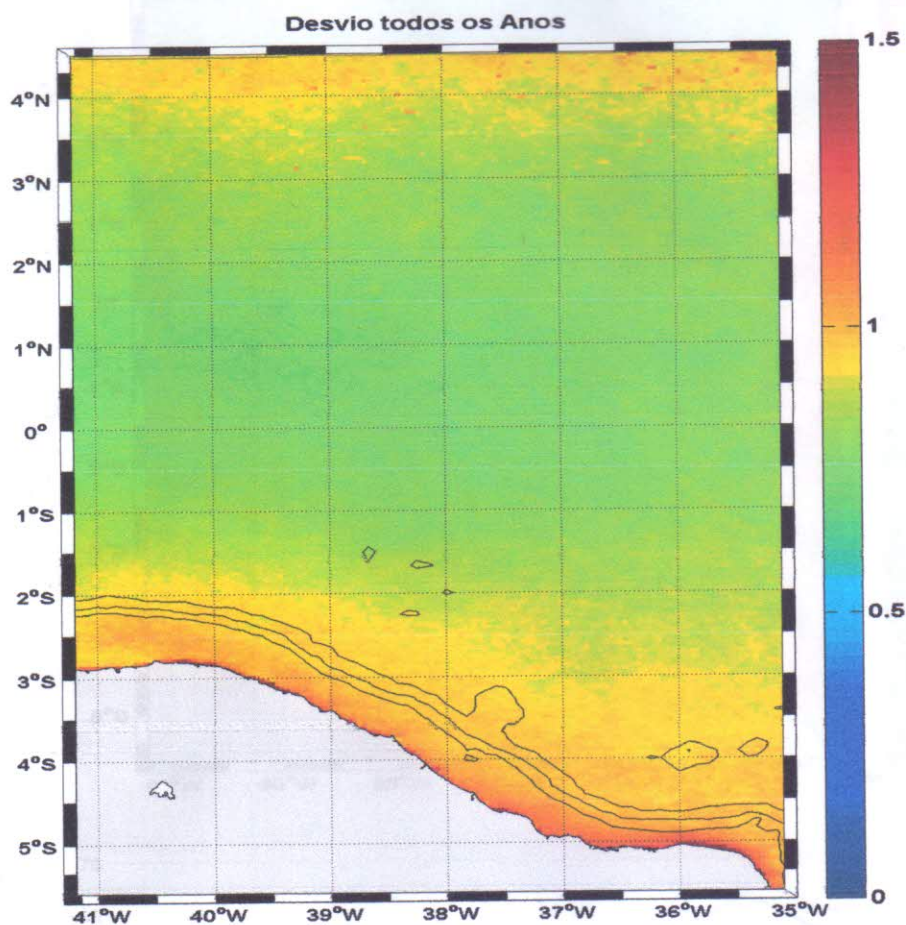


Fonte: a autora. Os pontos mostrados de P1 a P12 são os locais utilizados para as nossas análises. As linhas plotadas correspondem as isóbatas de 50, 200 e 1000m.

A figura 04 mostra o mapa de desvio padrão da TSM para os anos de 1982 a 2010. Observa-se a partir do mapa que os maiores valores ocorrem sobre a plataforma, junto à costa, devido ao fato de a profundidade ser menor e, portanto, apresentar uma menor capacidade térmica, respondendo mais intensamente as variações sazonais da incidência solar. No ASO os maiores valores de desvio padrão também ocorrem sobre a plataforma, principalmente na região do deságüe do Rio da Prata (TEIXEIRA *et al.*, 2009), que influencia significativamente os valores de desvio padrão sobre a plataforma adjacente. Na plataforma continental da área de estudo não existe nenhum rio com aporte suficiente para causar mudanças no desvio padrão. Assim os maiores valores encontrados ocorrem principalmente devido ao fato de a plataforma ser uma região mais rasa e possuir menor

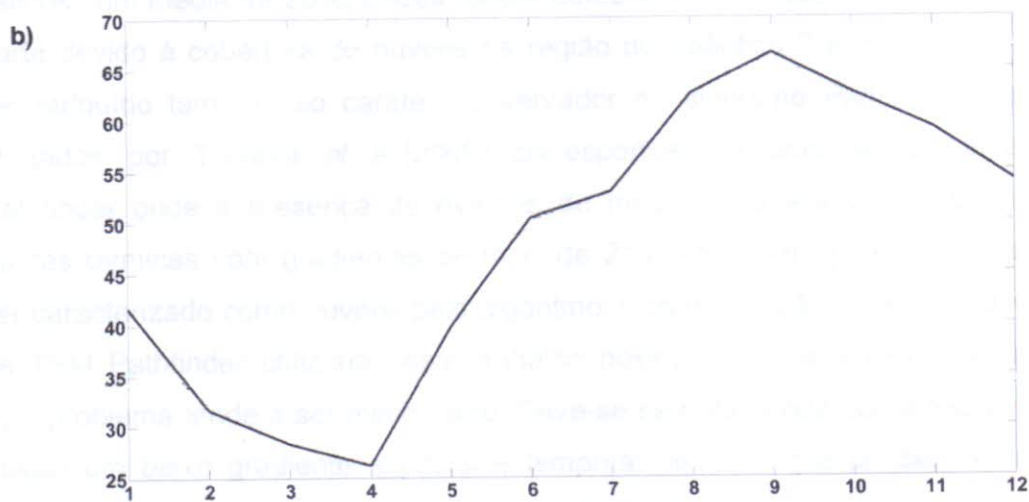
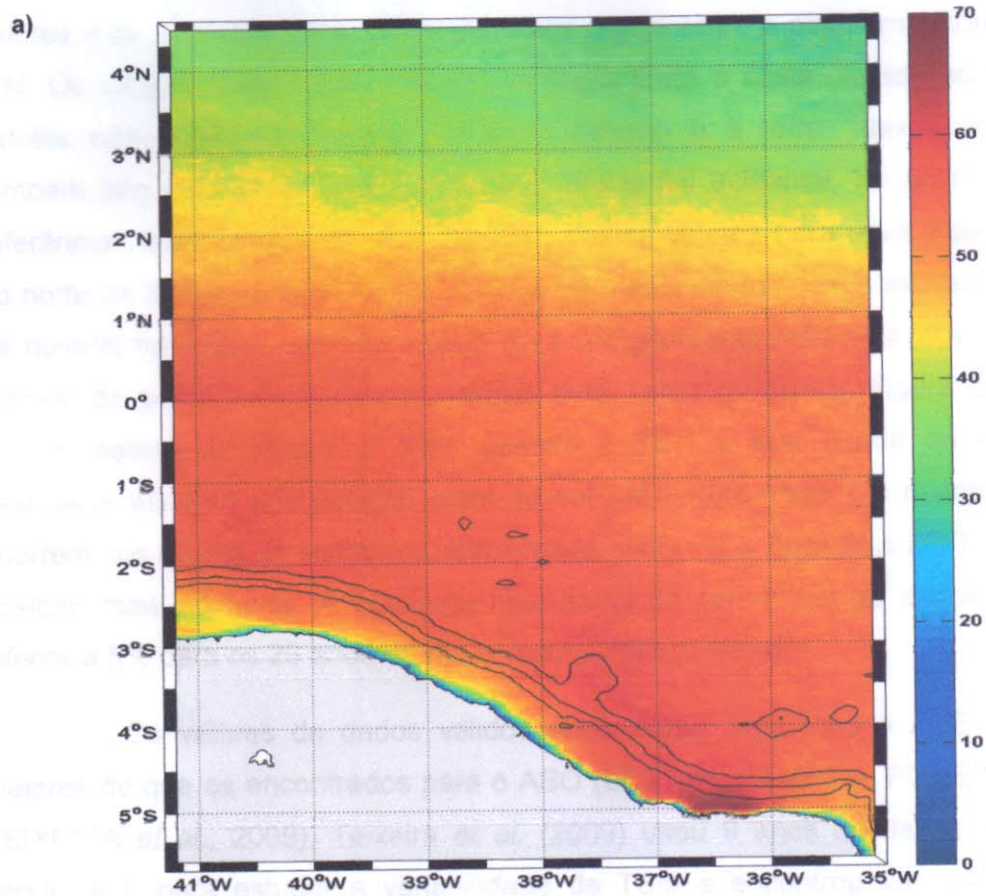
capacidade térmica. Os menores valores para o desvio padrão ocorrem próximo ao equador, entre 1°S e 3°N, quando o desvio padrão aumenta novamente, no entanto não há grande variação dos valores de desvio padrão em todo o domínio.

Figura 04 - Desvio Padrão da TSM entre 1982 e 2010 (°C).



Fonte: a autora.

Figura 05 - a) Porcentagem de dados Válidos (%). b) Variação sazonal da média espacial das porcentagens de dados válidos para toda a região de estudo.



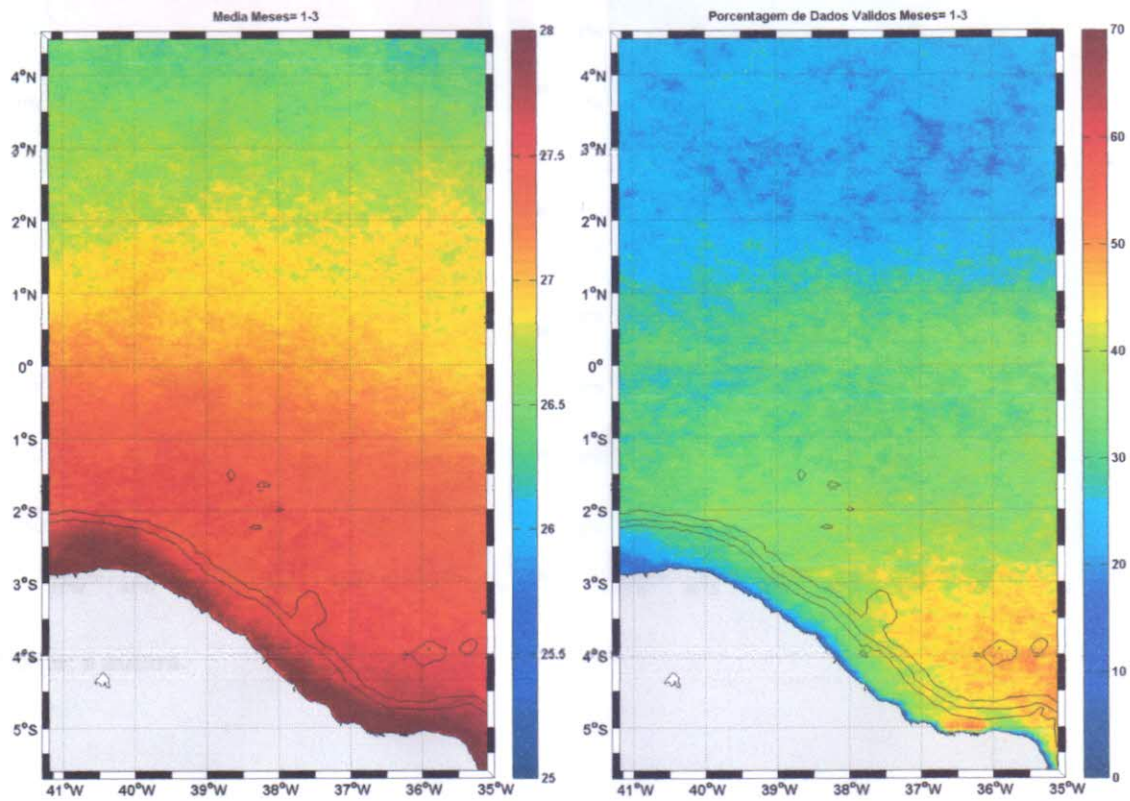
Fonte: a autora. A imagem b corresponde à variação da porcentagem de dados válidos nos meses de Janeiro (1) a Dezembro (12).

A figura 05 apresenta a porcentagem de dados válidos (ex.: não contaminada por nuvens) para cada pixel ao longo das 2119 imagens analisadas. A maior parte da área analisada apresenta alta porcentagem de dados válidos, com valores mais elevados (entre 60 e 70 %) na região entre a plataforma continental e 2°N. Os valores mais baixos são encontrados junto à costa, devido ao fato de o satélite não conseguir distinguir entre o oceano e a terra. Baixos percentuais também são encontrados na plataforma continental ocidental, no entanto não há referências que possam embasar a causa destes valores para essa área. A região ao norte de 3°N apresenta baixos percentuais relacionados com a intensa cobertura de nuvens na região, por ser a zona de posicionamento médio da ZCIT. A média mensal do percentual de dados válidos para todos os pixels (Figura 5b) mostra valores baixos de janeiro a abril, quando a ZCIT e sua banda de convecção associada atingem sua posição mais ao sul (dezembro-abril). Os maiores valores ocorrem nos meses de setembro, aproximadamente 70%, quando a ZCIT atinge sua posição mais ao norte. A diferença inter-anual no percentual de dados válidos é inferior a 5% para os 29 anos de observações (não mostrado).

Os valores de dados válidos encontrados aqui para o ASE são muito maiores do que os encontrados para o ASO (LENTINI; CAMPOS, PODESTA, 2000, TEIXEIRA *et al.*, 2009). Teixeira *et al.* (2009) usou 9 anos de dados *Pathfinder*, versão 4.1, para estudar a variabilidade de TSM e encontrou valores de dados válidos com média de 20%. Esses baixos percentuais de dados válidos ocorrem em parte devido à cobertura de nuvens na região do Atlântico Sul, no entanto, podem ser atribuído também ao caráter conservador do algoritmo *Pathfinder*. Os dados utilizados por Teixeira *et al.*(2009) correspondem a uma versão anterior do *Pathfinder* onde a presença de eventos de mesoescala associados ou não com frentes térmicas com gradientes de mais de 2° C em 27km, podem erroneamente ser caracterizado como nuvens pelo algoritmo. Como a versão atual (5.2) dos dados de TSM *Pathfinder* utilizada neste trabalho possui uma maior resolução espacial este problema tende a ser minimizado. Deve-se se notar ainda que a região do ASE possui um baixo gradiente espacial e temporal de TSM que também minimiza a detecção errônea de nuvens pelo algoritmo do *Pathfinder*.

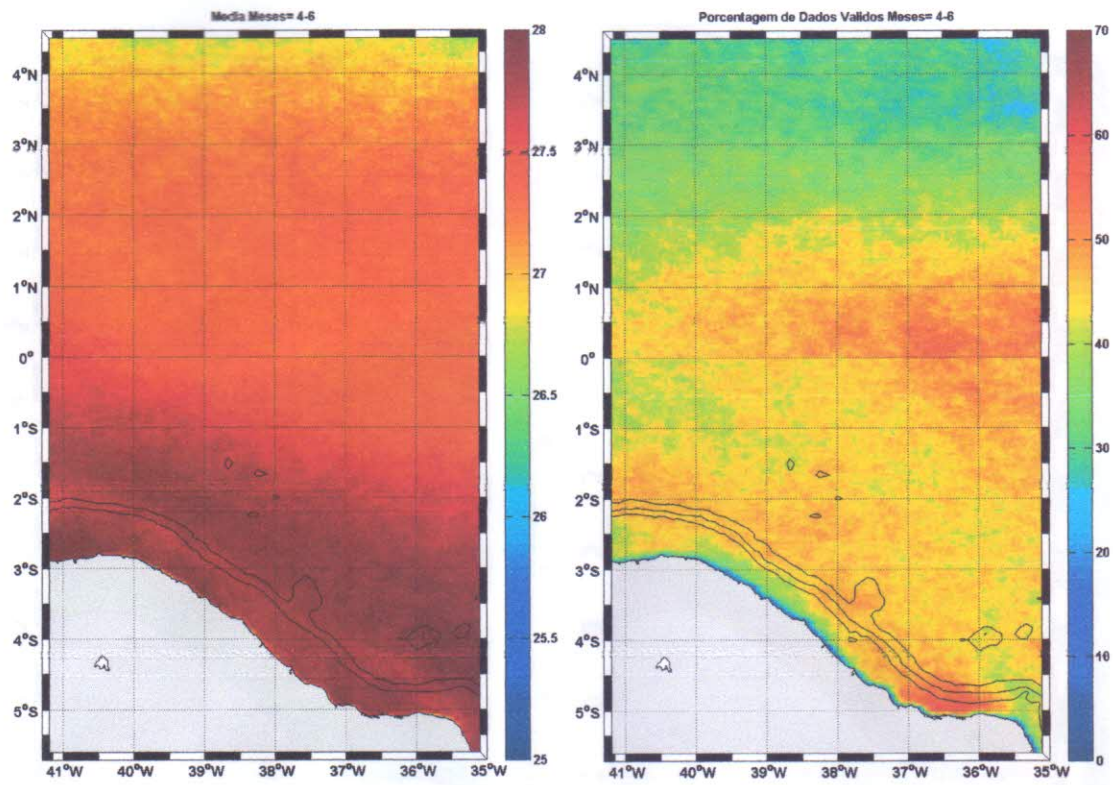
Teixeira *et al.* (2009) também mostraram que o baixo número de dados válidos e as diferenças sazonais na distribuição das lacunas no ASO não afetam a metodologia de análise de TSM proposta neste trabalho.

Figura 06 - Média e porcentagem de dados válidos para os meses de Janeiro à Março de todos os anos.



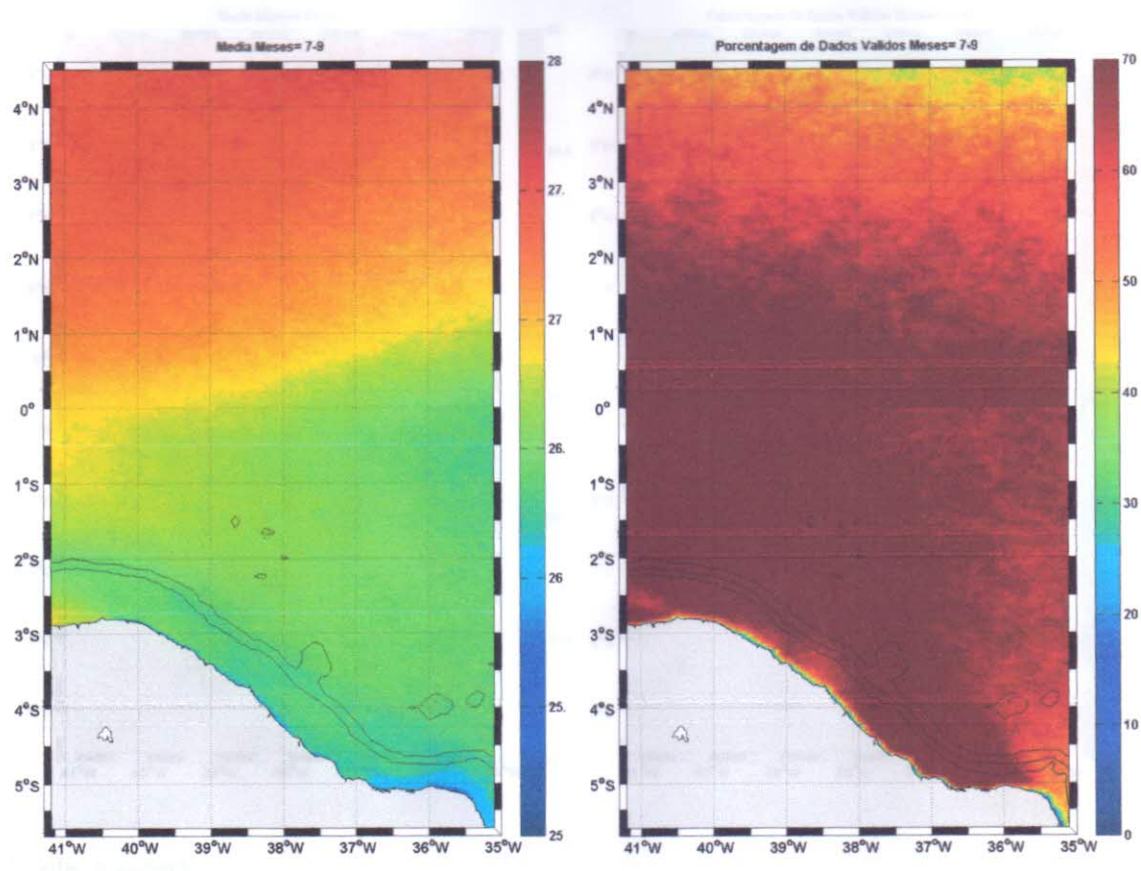
Fonte: a autora.

Figura 07 - Média e porcentagem de dados válidos para os meses de Abril a Junho de todos os anos.



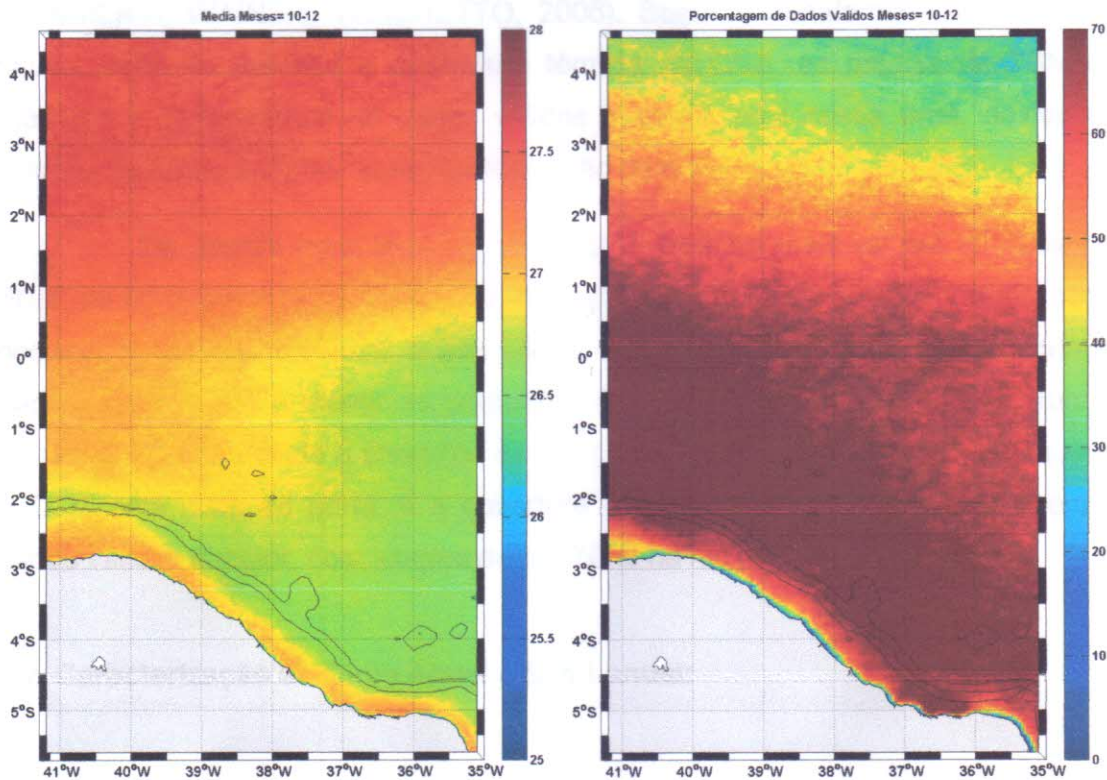
Fonte: a autora.

Figura 08 - Média e porcentagem de dados válidos para os meses de Julho a Setembro de todos os anos.



Fonte: a autora.

Figura 09 - Média e percentagem de dados válidos para os meses de Outubro a Dezembro de todos os anos.



Fonte: a autora.

Nas figuras 06 a 09, podemos ver as médias de TSM e percentagens de dados válidos para cada trimestre de todos os anos analisados. As maiores médias de TSM são para o trimestre que vai do mês de Abril até Junho, com médias entre 27° e 28° C em quase todo o domínio. As menores médias ocorrem no terceiro trimestre, com valores de aproximadamente 26°C próximo à região costeira, e valores entre 26,5 e 27° C ao norte de 0°. No quarto trimestre as médias começam a aumentar novamente e a diferença entre a região sobre a plataforma continental e em regiões de águas profundas é baixa (aproximadamente 0,5°C).

Nos meses de outubro a dezembro é possível ver a assinatura térmica da CNB sobre a quebra da plataforma continental, com valores aproximados de 26,5° C, enquanto sobre a plataforma as médias ficam em torno de 27° C. Nesses meses pode-se notar claramente que na região oceânica, onde as médias de TSM são maiores, o percentual de dados válidos é menor, pois regiões de elevada TSM estão

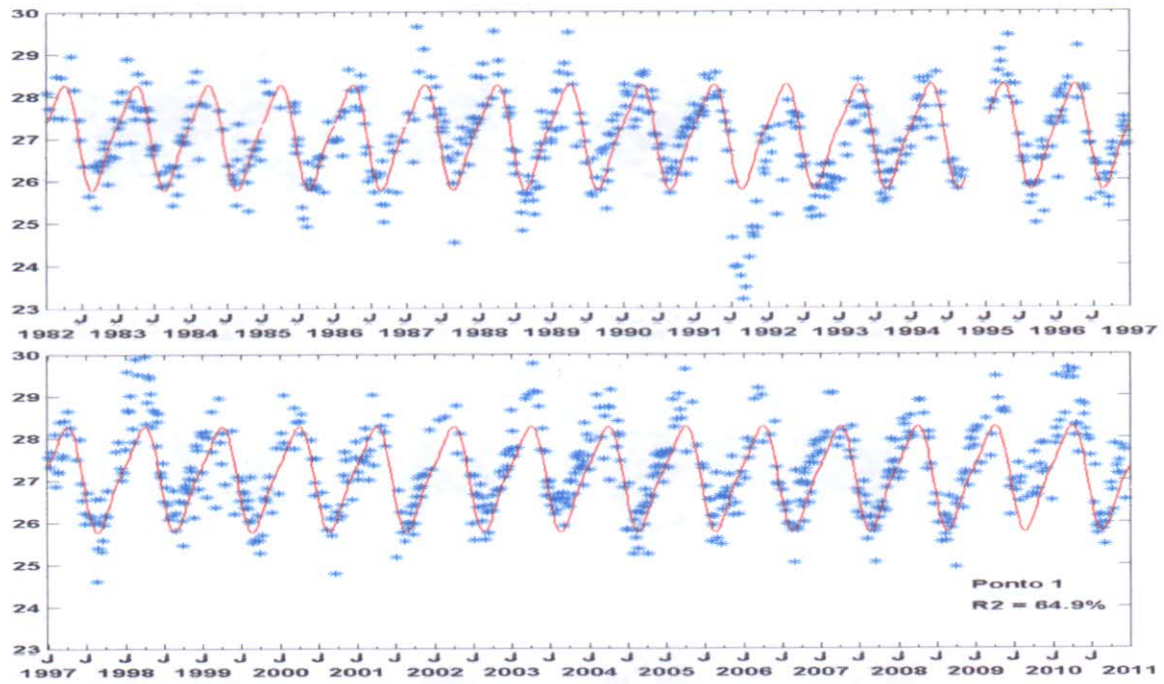
relacionadas com maior convecção, formando mais nuvens. No entanto, a convecção só é intensa para uma determinada faixa de TSM, de 26°C até 30°C (BOMVENTI; WAINER; TASCHETTO, 2006). Sobre a plataforma continental e o talude, onde se percebe a assinatura térmica da CNB, as médias de TSM são menores e o percentual de dados válidos maiores, pois nessa área, devido aos valores menores de TSM, há menor formação de nuvens.

De acordo com Melo *et al* (2002), a posição mais ao sul atingida pela ZCIT, na faixa longitudinal 40-32,5°W, ou seja, próximo ao litoral do Nordeste, ocorre nos meses de março e abril, o que condiz com os resultados da porcentagem de dados válidos, que é menor no primeiro e segundo trimestre, pois a cobertura de nuvens é intensa devido à presença da ZCIT. No terceiro e quarto trimestre, quando a ZCIT está mais ao norte, e a cobertura de nuvens diminui, a porcentagem de dados válidos é maior, com valores de até 70 % na maior parte do domínio.

4.2. Caracterização do Ciclo Anual e Semi-anual:

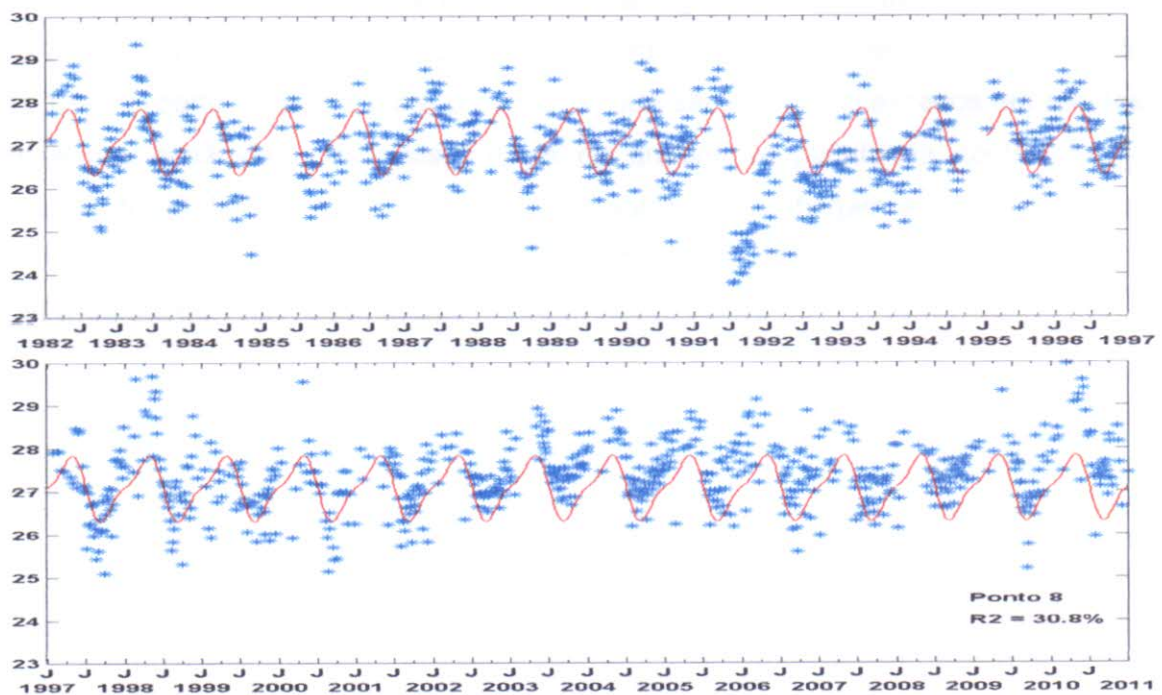
As observações dos dados originais de TSM (círculos azuis) e o ciclo anual mais o ciclo semi-anual estimados (linha vermelha) para três (P1, P8 e P10) dos doze pontos representativos da figura 03 são mostrados nas figuras 10 a 12. Estes pontos foram escolhidos para mostrar situações diferentes: P1, onde os sinais anual mais o semi-anual explicam a maior parte da variabilidade de TSM ($R^2 = 64,9\%$); no caso de P8 ($R^2 = 30,8\%$) e P10 ($R^2 = 5,08\%$) ocorre situação oposta.

Figura 10 - Valores de TSM derivados dos dados 'Pathfinder' (pontos) e o ciclo anual ajustado (curva). Ponto 1. (°C).



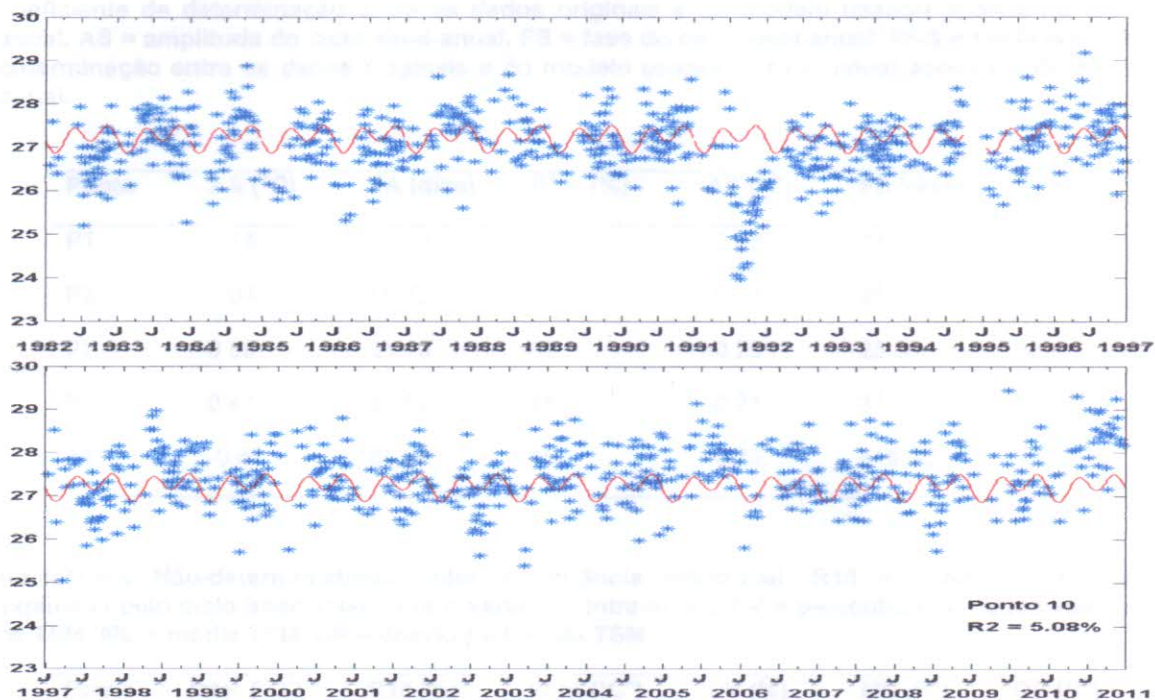
Fonte: a autora.

Figura 11 - Valores de TSM derivados dos dados 'Pathfinder' (pontos) e o ciclo anual ajustado (curva). Ponto 8. (°C).



Fonte: a autora.

Figura 12 - Valores de TSM derivados dos dados 'Pathfinder' (pontos) e o ciclo anual ajustado (curva). Ponto 10. (°C).



Fonte: a autora.

Nota-se (Figuras 10 a 12 e tabela 2) que os pontos com maior coeficiente de determinação (R^2) encontram-se próximo à região costeira, que vão do ponto 1 ao 7. Ou seja, nessa região o ciclo anual é o principal responsável pela variabilidade da TSM. A partir do ponto 8 até o ponto 12, que são pontos localizados em regiões de águas oceânicas profundas, depois da quebra da plataforma continental, o coeficiente de determinação decresce, com valores que chegam a 5,08% no ponto 10, em aproximadamente 1° N, mostrando que o ciclo anual não explica a variabilidade da TSM nessa área.

Tabela 2 - Resumo dos resultados para os pontos P1, P3, P7, P9 e P11.

Resultados determinísticos: AA = amplitude do ciclo anual. FA = fase do ciclo anual. R²-A = coeficiente de determinação entre os dados originais e do modelo usando apenas no ciclo anual. AS = amplitude do ciclo semi-anual. FS = fase do ciclo semi-anual. R²-S = coeficiente de determinação entre os dados originais e do modelo usando o ciclo anual acrescido do semi-anual.

Ponto	AA (°C)	FA (dias)	R ² -A (%)	AS (°C)	FS (dias)	R ² -S (%)
P1	1.15	56.51	78	-0.28	17.37	81
P3	1.04	59.72	70	-0.23	26.00	73
P7	0.88	81.19	65	-0.20	23.39	68
P9	0.47	82.60	45	-0.21	31.84	49
P11	-0.67	61.94	46	-0.29	418.26	52

Resultados Não-determinísticos: Inter = variância interanual. R1/I = variância residual explicada pelo ciclo interanual. Intra = variância intra-anual. DV = percentual de dados válidos de TSM. MD = média TSM. DP = desvio padrão da TSM.

Ponto	Inter (°C ²)	R1/I (%)	Intra (°C ²)	DV (%)	MD (°C)	DP (°C)
P1	0.09	75	0.27	51	27.07	1.05
P3	0.14	68	0.33	46	27.04	1.02
P7	0.16	64	0.29	56	27.00	0.92
P9	0.16	66	0.30	53	26.74	0.79
P11	0.16	75	0.47	31	27.11	0.94

Fonte: a autora.

Pelas figuras observa-se ainda que existem anos em que as temperaturas máximas ou mínimas são muito diferentes do ciclo anual, mostrando que existe uma variabilidade inter-anual demarcada.

Em 1991, por exemplo, foram encontrados valores relativamente baixos de TSM até 3 graus menores que o ciclo anual. Esses valores na verdade são irrealistas e resultam de grandes desvios negativos dos dados de TSM provenientes dos satélites devido ao grande aumento de aerossóis vulcânicos liberados pelo Monte Pinatubo, localizado nas Filipinas, em junho de 1991 (REYNOLDS, 1993). Altos valores de TSM aparecem nos anos 1998 e 2010, mas a razão para estas

anomalias não é clara. Especula-se que este aquecimento no ano de 1998 seja influência do fenômeno El Niño (CLAUZET, WAINER, SERVAIN, 2005), que se manifestou com grande intensidade no Oceano Pacífico entre 1997 e 1998. Durante períodos de El Niño ocorre um aumento na diferença de TSM entre o Atlântico Tropical Norte (mais quente) e o Atlântico Tropical Sul (mais frio), e um deslocamento da ZCIT para o norte.

De acordo com Servino (2011), a área mais afetada pelo ENSO se encontra no Atlântico Tropical Norte, a oeste de 40° W e entre 10° N e 20° N, onde cerca de 50-80% da variabilidade anômala de TSM nesta região está associada ao ENSO. Esta variação ocorre devido ao enfraquecimento dos ventos alísios de NE na região, acarretando em uma redução na perda de calor latente, calor sensível e perda de calor por entranhamento. Em seguida a este aquecimento ocorre um fortalecimento dos alísios de SE no Atlântico Tropical Sul, que, além de deslocarem a ZCIT para norte, após alguns meses podem levar a uma anomalia negativa de TSM na costa da Angola e positiva ao longo da costa brasileira até em torno de 30° S.

Na figura 13 é apresentado o mapa das amplitudes do ciclo anual de TSM. Nota-se, em geral, baixos valores de amplitude da TSM. Uma maior variação de temperatura ocorre sobre a plataforma continental, na região costeira, pelo fato de ser uma região rasa, que possui menor capacidade térmica e responde mais intensamente às variações na incidência solar. A amplitude aumenta em direção ao leste com valores máximos (aproximadamente 1,5 ° C) na região costeira em cerca de 36° W. Os valores de amplitude do ciclo anual decrescem em direção ao norte do domínio, apresentando uma menor variação da temperatura na região entre 1°S e 3°N.

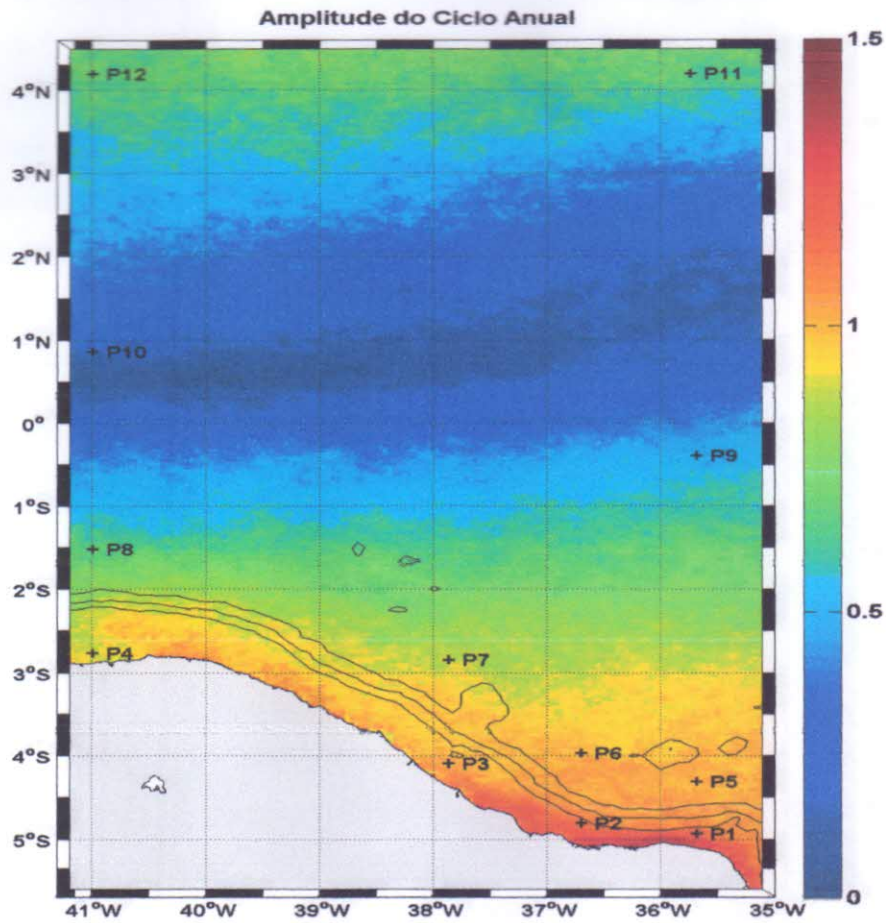
As amplitudes do ciclo anual de TSM na região do ASE são 10 vezes menores do que as amplitudes encontradas nas regiões subtropicais do ASO por Lentini, Campos e Podesta (2000) e por Teixeira *et al.* (2009). Esse resultado é esperado, pois o ciclo de aquecimento / arrefecimento sazonal impõe maior variabilidade nas latitudes médias quando comparadas com latitudes menores. A plataforma continental do ASO também recebe aporte continental de um grande rio (Rio da Prata), que gera mudanças significativas na TSM.

O coeficiente de determinação (R^2) entre o ciclo anual e os dados originais de TSM (figura 14) mostra que o ciclo anual explica a maior parte da variação de TSM no ASE. Valores de R^2 superiores a 60% ocorrem na plataforma continental leste, permitindo concluir que o ciclo anual é o principal responsável pela variabilidade da TSM nessa região, e diminuem em direção ao norte. A região norte de $1,5^\circ$ S apresenta valores de R^2 menores do que 30%, mostrando que o ciclo anual de TSM não pode explicar corretamente a variabilidade de TSM nesta região e, portanto, os resultados de amplitude e fase da TSM devem ser desprezados para essa área.

Os valores de R^2 encontrados na plataforma continental do ASE são pequenos quando comparados com a plataforma do ASO, onde Lentini, Campos e Podesta (2000) e Teixeira *et al.* (2009) mostraram que o ciclo anual explica mais de 90% do total da variabilidade nessa região.

Comparando-se o mapa de dados válidos (figura 04) e o mapa de R^2 (figura 14), nota-se que a quantidade de dados válidos não gera impacto sobre o desempenho do ajuste de mínimos quadrados da equação 1. Por exemplo, quando comparados os resultados de R^2 com o percentual de dados válidos para o ASE, percebe-se que na região entre 1° N e 2° N, apesar da grande quantidade de dados válidos (aproximadamente 50%), os valores de R^2 são baixos (entre 10 e 20%), mostrando que nessa região o ciclo anual não explica a variabilidade da TSM. Estes resultados reforçam a idéia de que o baixo número de dados válidos não afeta a análise de TSM (Teixeira, 2009).

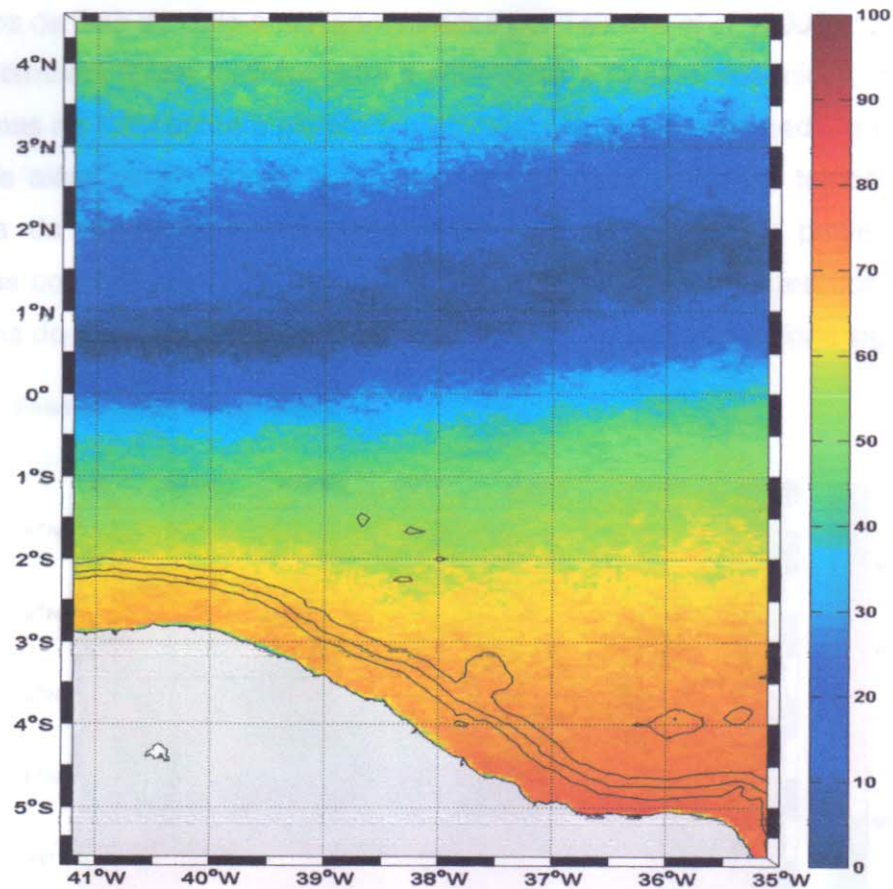
Figura 13 - Amplitude do Ciclo Anual (°C).



Fonte: a autora.

Quando se comparam os mapas de desvio padrão (figura 04) e a amplitude do ciclo anual (figura 13), percebem-se padrões similares em ambos os mapas, principalmente sobre a plataforma continental, onde se observou os maiores valores de desvio padrão e de amplitude do ciclo anual. Na região oceânica entre 2° S e 3,5° N são observados os menores valores de desvio padrão e também de amplitude do ciclo anual. Essa similaridade reforça os resultados do coeficiente de determinação (R^2) calculado e a idéia de que o ciclo anual é o principal responsável pela variabilidade da TSM na região.

Figura 14 - R² Anual (%).

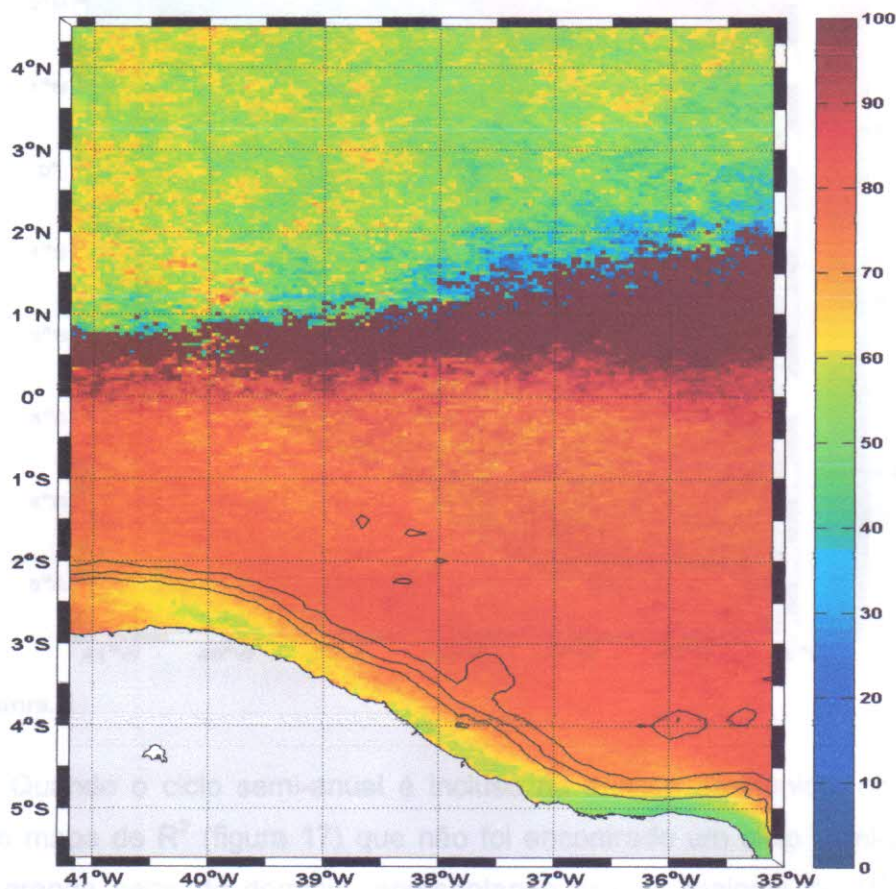


Fonte: a autora.

Na figura 15 são apresentadas as fases associadas ao ciclo anual, tendo como referência o dia 1 de Janeiro. A plataforma continental e a região oceânica apresentam fases distintas. As máximas de TSM ocorrem mais cedo (entre 45 e 60 dias) sobre a plataforma continental, junto à costa, já que essa região é mais rasa e, portanto, possui menor capacidade térmica, o que gera uma resposta mais rápida às variações na incidência solar. Ao norte do equador, acima de 2°N, também ocorre máximas de temperatura mais cedo (entre 50 e 70 dias) quando comparado com a região oceânica entre 2°S e a quebra da plataforma, onde as fases de máxima temperatura ocorrem mais tarde (70 a 90 dias). Os resultados da região aproximadamente entre 0° e 2°N, região que apresenta valores de fase maiores do que 80 dias, não devem ser considerados pelos baixos valores de R² encontrados.

Observa-se que existe uma diferença de 30 dias entre a ocorrência de máxima temperatura sobre a plataforma continental e as regiões oceânicas. Os resultados de fase do ciclo anual encontrados por Teixeira *et al.* (2009) para a região do ASO também foram distintos para a plataforma e regiões oceânicas, no entanto, as máximas de TSM sobre a plataforma do ASO ocorreram mais cedo, entre 35 e 45 dias, pois além de a plataforma ser uma região mais rasa está também sobre a influência da descarga de águas relativamente mais quentes provenientes de descargas continentais como por exemplo o Rio da Prata e a Lagoa dos Patos. Na plataforma do ASE, por outro lado, não há presença de rios com aporte significativo.

Figura 15 - Fase do Ciclo Anual (dias).

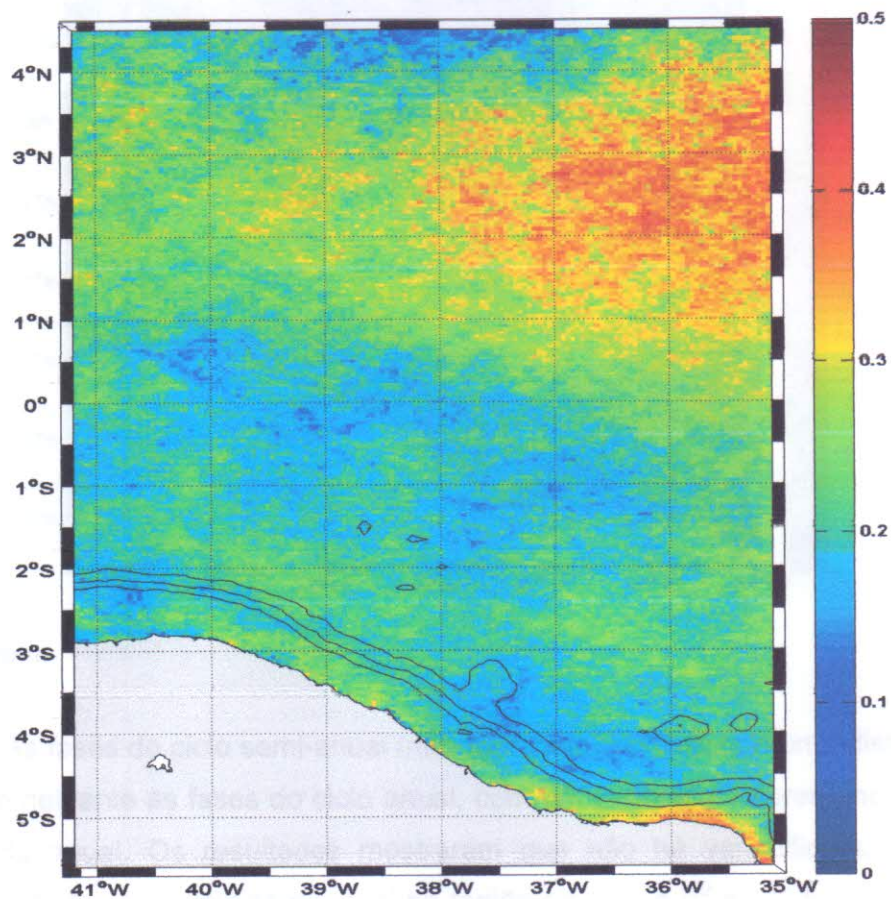


Fonte: a autora.

A amplitude do ciclo semi-anual (figura 16) apresenta os maiores valores (entre 0,3 e 0,5° C) sobre a plataforma continental leste e na região oceânica a nordeste do domínio (ao norte de 1° N). Embora essa região apresente valores

máximos quando comparados com a região oceânica adjacente, pelos resultados de R^2 (figura 17) obtidos para o ciclo semi-anual, essa região não possui uma boa adequação do ciclo semi-anual calculado com os dados originais, com valores de R^2 em aproximadamente 10%.

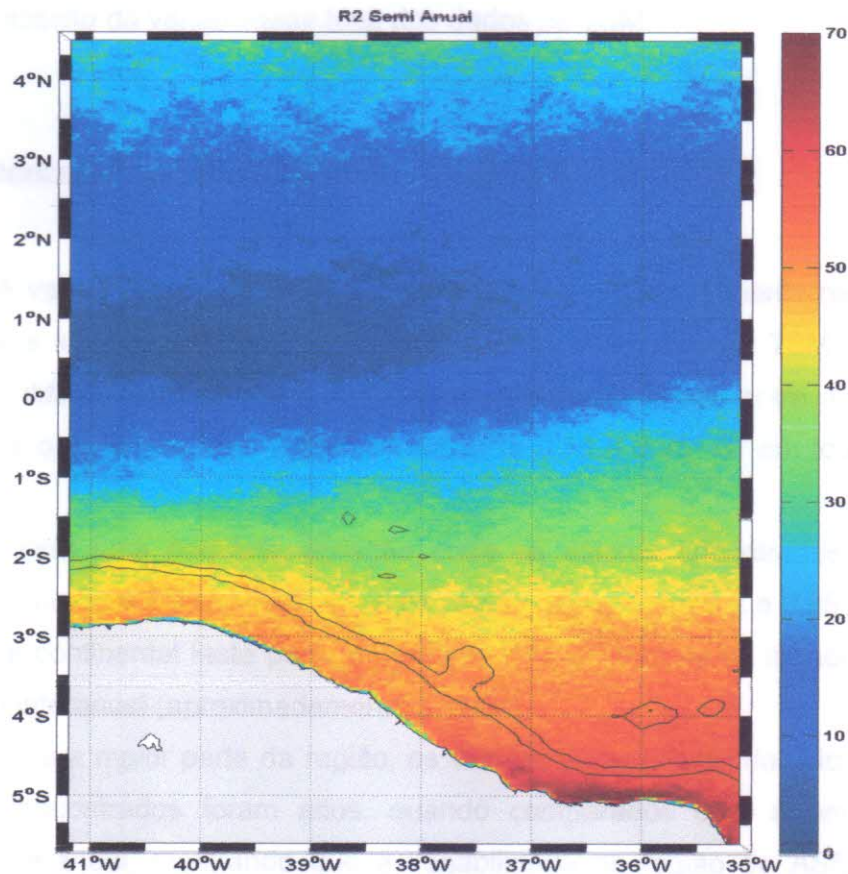
Figura 16 - Amplitude do Ciclo Semi-Anual (°C).



Fonte: a autora.

Quando o ciclo semi-anual é incluído na análise harmônica, observa-se através do mapa de R^2 (figura 17) que não foi encontrado um ciclo semi-anual de TSM em grande parte do domínio, apresentando valores maiores de R^2 sobre a plataforma continental e região oceânica até aproximadamente 1° S, e valores de 0 a 20% na maior parte da região (entre 1° S e 4° N). A componente semi-anual da amplitude de TSM é em geral três vezes menor que a do ciclo anual, caracterizando assim a dominância do ciclo anual sobre o semi-anual na variabilidade total da TSM para a área de estudo.

Figura 17 - R^2 Semi-Anual (%).



Fonte: a autora.

As fases do ciclo semi-anual (não mostrada) apresentam uma distribuição espacial semelhante às fases do ciclo anual, com um terço dos valores encontrados para o ciclo anual. Os resultados mostraram que não há variabilidade espacial significativa da fase do ciclo semi-anual na região em que o R^2 é válido. Os valores, referente ao 1° de janeiro, ocorrem mais cedo (entre 20 e 40 dias) desde a plataforma continental até 2° N.

A figura 17 apresenta os resultados do coeficiente de determinação (R^2) calculado quando se inclui o ciclo semi-anual na análise harmônica. Entre 1° S e 0° os resultados mostram que o modelo com os ciclos anual mais semi-anual também não é válido para esta região. Quando se comparam os índices de R^2 para o ciclo anual e semi-anual mais anual (figuras 14 e 17) observa-se que a inclusão do ciclo semi-anual no modelo melhora a explicação da variabilidade da TSM em

aproximadamente 5% ao sul de 1° S. Acima de 3° N a inclusão do ciclo semi-anual piora a explicação da variabilidade total dos dados de TSM.

4.3. Caracterização da Variabilidade Inter e Intra-Anual:

A variância dos dados residuais filtrados (R1), apresentada na figura 18, nos fornece a amplitude da variabilidade inter-anual dos dados de TSM. Não foram observadas diferenças espaciais significativas em seus valores entre a plataforma continental e o oceano aberto, com valores entre 0,15 e 0,25° C² em toda a região analisada.

Existe uma pequena variação entre os valores encontrados na região leste do domínio, entre 0,1 e 0,15° C², e na região oeste, entre 0,2 e 0,25° C². Sobre a plataforma continental leste perto da origem da NBC tem-se os menores valores de variação interanual (aproximadamente 0,1° C²).

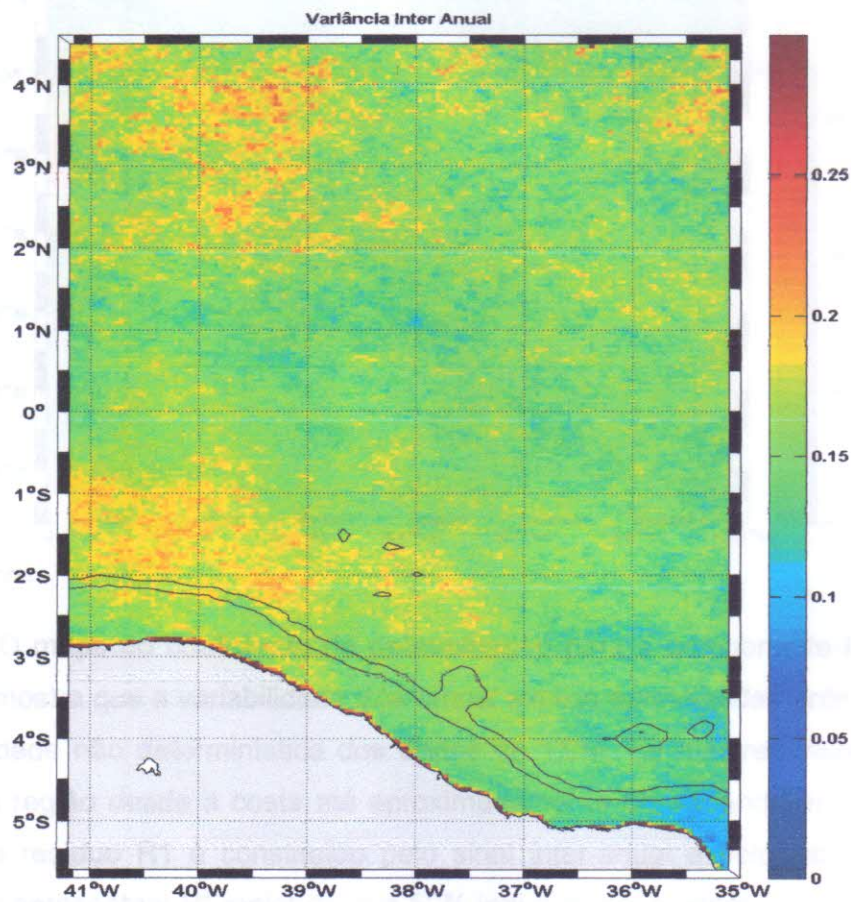
Para a maior parte da região, os valores de amplitude dos ciclos anual e semi-anual encontrados foram altos, quando comparados com a amplitude da variância inter-anual, mostrando que a variabilidade na região do ASE é melhor explicada pelo ciclo anual e semi-anual.

Na região oceânica a oeste do domínio, entretanto, os valores de variabilidade inter-anual são maiores que a amplitude anual e semi-anual. O mapa de R² inter-anual (figura 19) na região entre 3° S e 0° apresenta também os maiores valores, cerca de 50%, caracterizando essa região como de maior influência do ciclo inter-anual. Essa região apresenta também os menores valores de desvio padrão, aproximadamente 0,7° C.

Sobre a plataforma leste os resultados de R² intra-anual apresentam valores maiores (aproximadamente 70%) que o R² inter-anual (aproximadamente 30%), mostrando que sobre essa região o ciclo intra-anual exerce maior influência que o ciclo inter-anual. Os valores de variância encontrados sobre a plataforma leste foram mais baixos, quando comparados com a região oceânica, tanto para o ciclo inter-anual (entre 0,05 e 0,01° C²) quanto para o intra-anual (0,3 e 0,4° C²), onde os valores de desvio padrão são um pouco maiores, aproximadamente 1,5° C

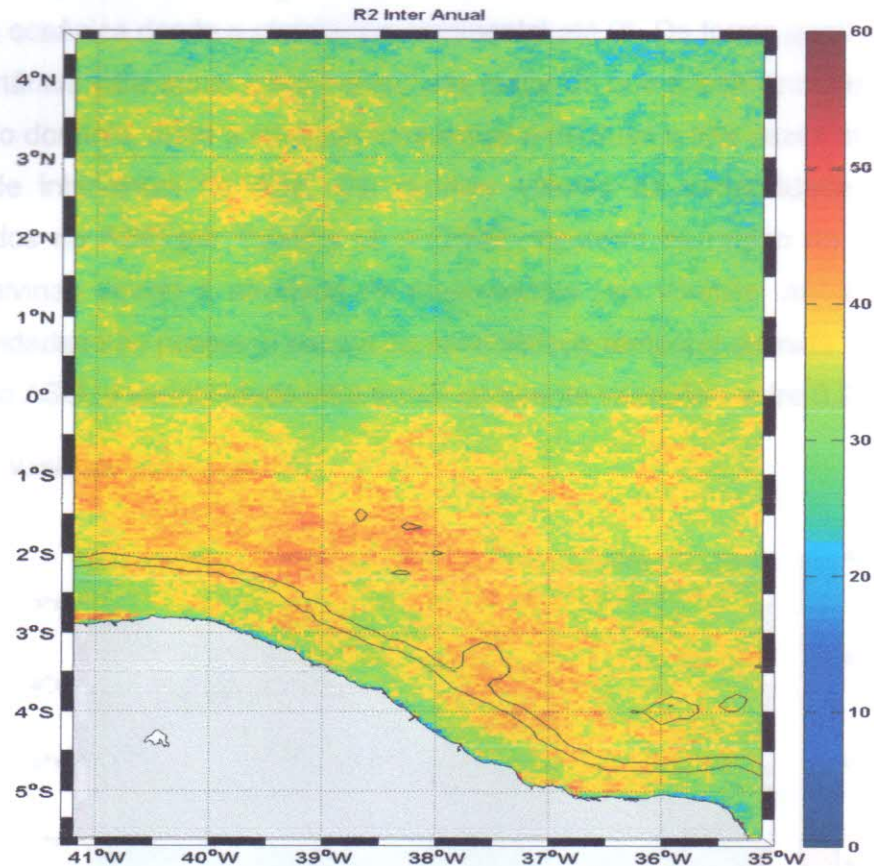
A variabilidade inter-anual no ASE é pequena quando comparado com os resultados encontrados para o ASO por Teixeira *et al.* (2009). Os autores acharam valores máximos, entre 1 e 1,2° C², sobre a plataforma continental da Argentina e valores entre 0,3 e 0,8° C² na maior parte do domínio. No entanto os valores de variância inter-anual de TSM são entre 10 - 20% da amplitude do ciclo anual em ambas as regiões (ASO e ASE).

Figura 18 - Variância Inter-Anual (°C).



Fonte: a autora.

Figura 19 - R^2 Inter-anual (%).



Fonte: a autora.

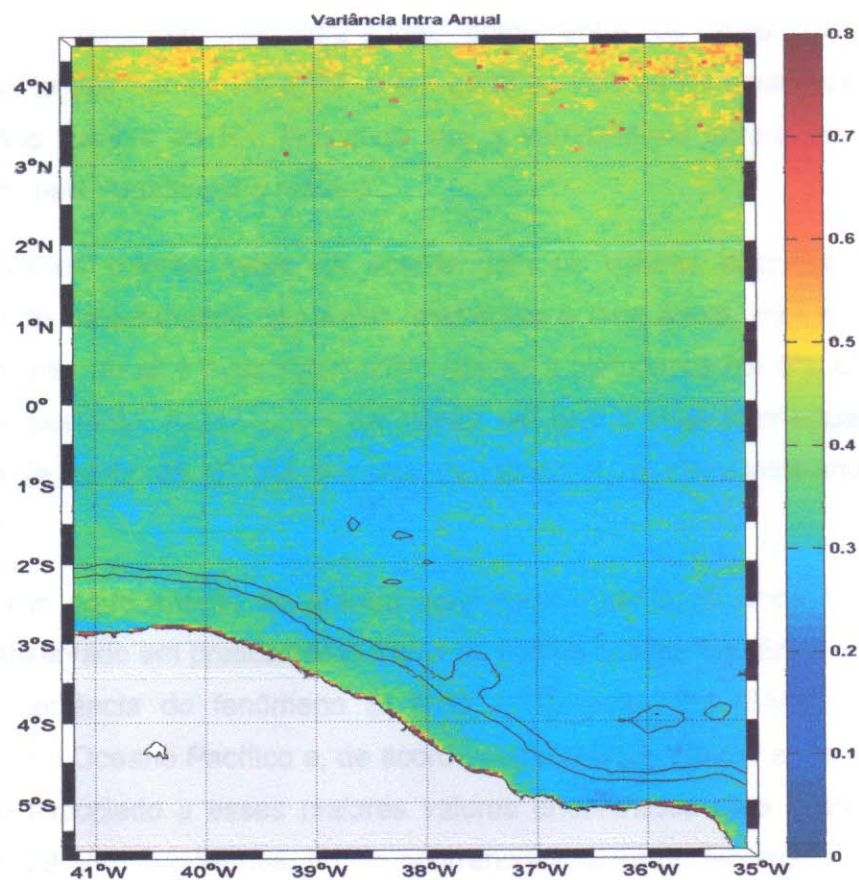
O mapa do coeficiente de determinação para a componente inter-anual (figura 19) mostra que a variabilidade inter-anual explica aproximadamente 30 a 40% da variabilidade não determinística dos dados de TSM. Os maiores valores de R^2 ocorrem na região desde a costa até aproximadamente 0° , variando entre 40 e 60%. Como o resíduo R1 é constituído pelo sinal inter-anual e pelo intra-anual, as regiões que apresentam R^2 maior do que 50% indicam que a variabilidade interanual é dominante sobre a variabilidade intra-anual.

Ao norte de 0° , o R^2 inter-anual apresenta valores próximos a 30% mostrando que a variabilidade intra-anual é dominante nessa região.

Fonte: a autora.

Os maiores valores da variância intra-anual (figura 20) são encontrados na região da plataforma continental ($0,3 - 0,5 \text{ } ^\circ \text{C}^2$), e os menores valores na região oceânica desde a plataforma continental até 0° . De forma geral percebe-se que a variância intra-anual possui amplitude maior do que a inter-anual em todas as regiões do domínio, onde a variação intra-anual é de duas a três vezes maior do que o sinal de inter-anual no ASE. Os maiores valores da variabilidade intra-anual encontrados no ASO por Teixeira *et al.*(2009), ocorrem na região da Confluência Brasil Malvinas devido à atividade de meso-escala (ex. vórtices, anéis, etc.), pois estas atividades não possuem escala de variabilidade temporal definida. Nas demais regiões do ASO, a variabilidade intra-anual apresenta variações entre $0,2$ e $0,8 \text{ } ^\circ \text{C}^2$.

Figura 20 - Variância Intra-Anual ($^\circ \text{C}$).



Fonte: a autora.

4.4 Resíduo não determinístico:

Os gráficos com as séries temporais da variabilidade não determinística dos dados de TSM para os pontos selecionados para a análise são apresentados nas figuras 21 a 24. Dos doze pontos que se realizaram as análises, só quatro são aqui representados (P1, P3, P9 e P11). O resíduo R1, após o ciclo determinístico (ciclo anual mais semi-anual) ter sido retirado, é representado pelos pontos azuis. A linha preta representa a variabilidade inter-anual da TSM representada pelo filtro de média móvel de 365 dias dos dados residuais R1. A variabilidade devido ao sinal intra-anual é representada pelos pontos vermelhos e corresponde ao resíduo R1 menos a variabilidade inter-anual. O ciclo intra-anual é maior que o inter-anual na maior parte do tempo, embora alguns pontos apresente valores maiores de variabilidade inter-anual que intra-anual, como entre os anos 2010 e 2011, principalmente dos pontos P3 e P9, e em geral os valores do sinal intra-anual são similares aos valores de R1, indicando que a variabilidade intra-anual é a maior responsável pela variabilidade residual.

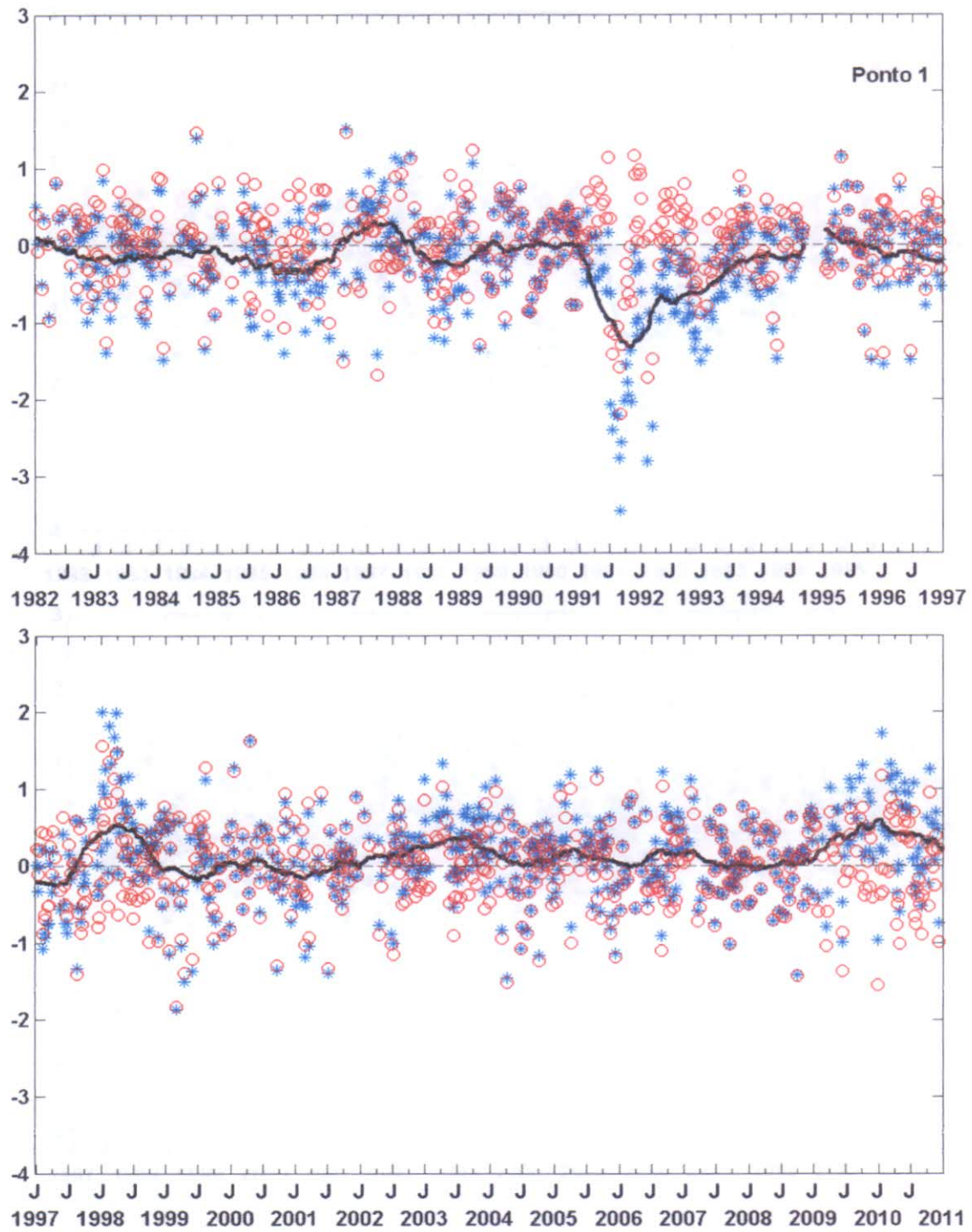
Esses valores estão de acordo com os valores encontrados para o coeficiente de determinação dos ciclos inter-anual e intra-anual, pois na região em que o sinal inter-anual é mais significativo (desde a plataforma até 0°), o intra-anual é menos importante. Assim como na região em que o ciclo inter-anual é menos importante (a partir de 0° até o norte do domínio), o ciclo intra-anual é mais importante.

Um aquecimento de grande magnitude durante os anos 1998 e 2010 pode ser observado em praticamente todos os pontos analisados. Entre 1997 e 1998 houve a ocorrência do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENSO) de grande intensidade no Oceano Pacífico e, de acordo com Clauzet, Wainer e Servain (2005), pode estar associado a esses maiores valores encontrados para o ano de 1998. Durante os 29 anos analisados, houve ocorrência intensa do fenômeno El Niño nos anos 1982-1983, 1987-1988 e 1997-1998, com a ocorrência também em outros anos, embora nos demais anos a ocorrência tenha sido considerada moderada ou fraca (ex. 2009-2010). O fenômeno La Niña ocorreu com mais intensidade nos anos de 1984-1985, 1988-1989, 1998-2001 e 2007-2008. Esses anos, de acordo com as séries temporais (figuras 21 a 24), apresentam valores negativos de variabilidade

inter-anual, exceto os anos 1998-1999. Os anos de ocorrência do El Niño, ao serem analisados nas séries temporais (figuras 21 a 24), apresentaram valores negativos de variabilidade inter-anual, exceto os anos de 1987-1988 e 2009-2010. Saravanan e Chang (2000) sugerem que no Atlântico a resposta dominante ao fenômeno ENSO é um resfriamento da TSM no Atlântico Equatorial e, apesar dos dados estarem mais frios durante os anos de El Niño, segundo esses autores, ainda não existe um consenso claro sobre os mecanismos pelos quais o ENSO realmente afeta a variabilidade do Atlântico Tropical. Além disso, de acordo com Servino (2011), para o Atlântico Equatorial, algumas regiões têm a TSM mais afetada pelos eventos do ENSO do que outras, sendo o Atlântico Tropical Norte, à oeste de 40° W entre 10°N e 20°N, a região mais afetada.

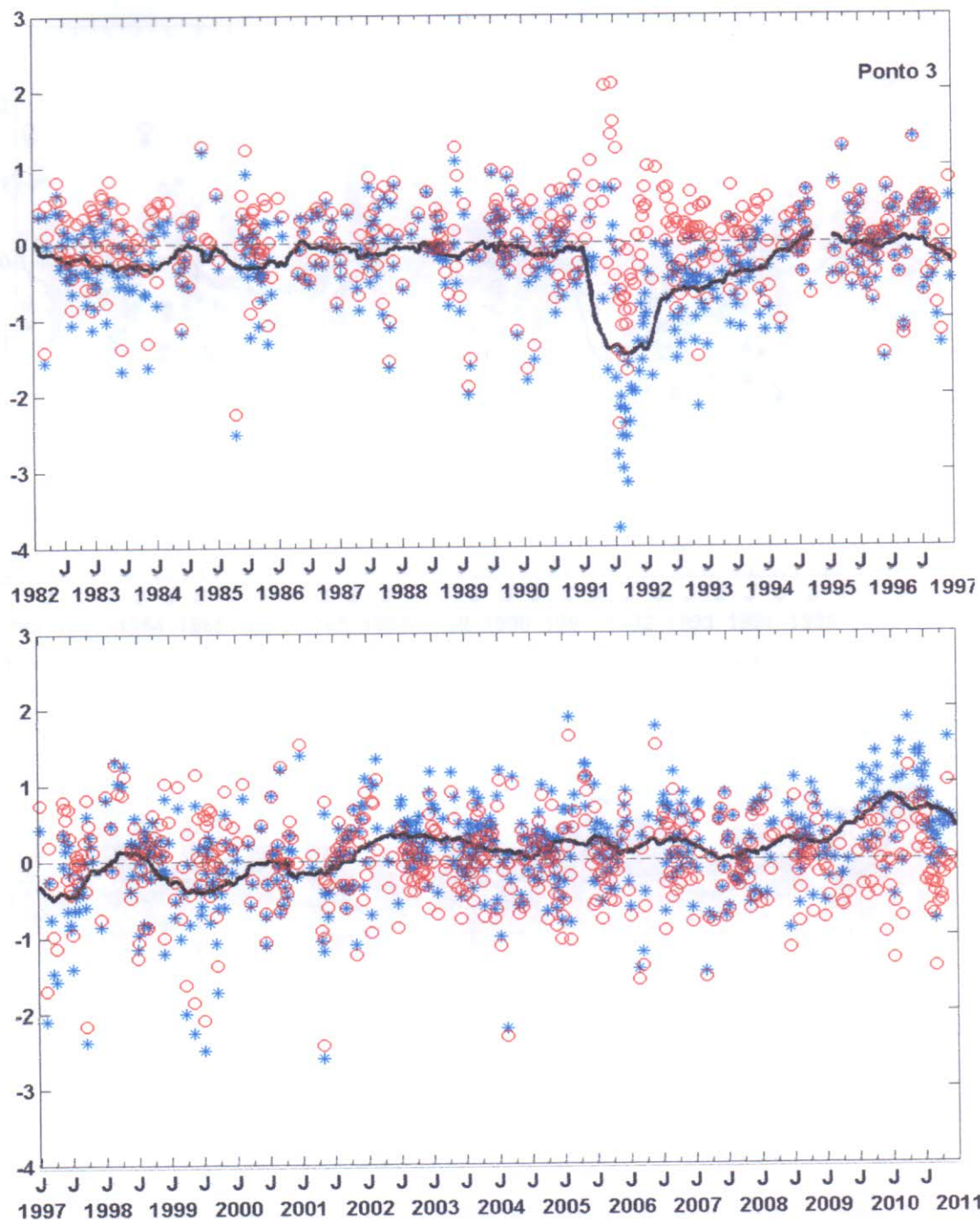
Em 1992, temos grandes valores negativos de variabilidade inter-anual em todos os pontos analisados. Como apontado anteriormente, nesse ano houve um aumento considerável da emissão de aerossóis vulcânicos pelo Monte Pinatubo (REYNOLDS, 1993), que gerou grandes desvios negativos no satélite, alterando as medições de TSM em grandes partes do globo.

Figura 21 - Séries temporais da variabilidade não determinística dos dados de TSM. Resíduo interanual no ponto 1.



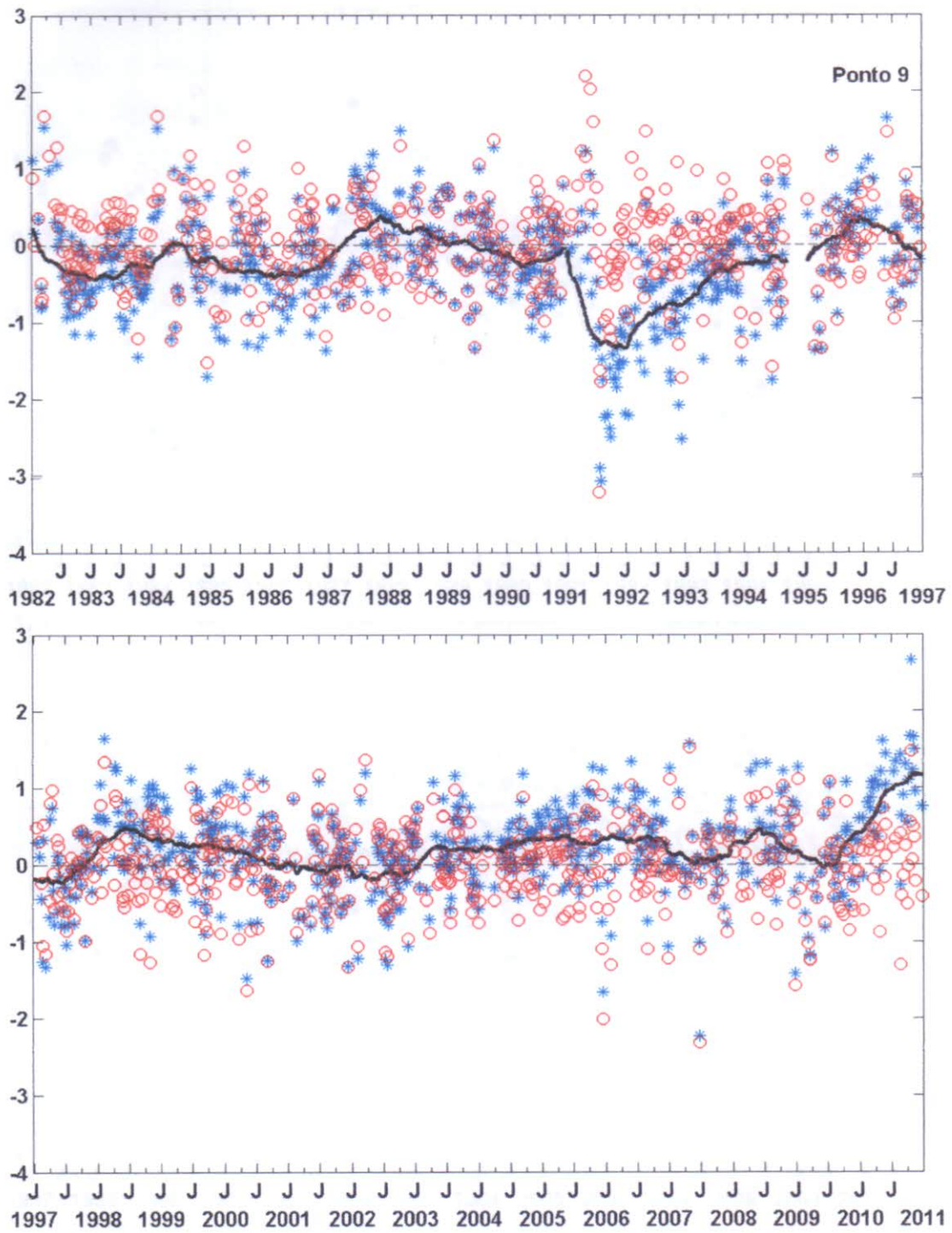
Fonte: a autora. Os pontos azuis correspondem ao resíduo R1, depois de que o ciclo determinístico foi subtraído dos dados originais. A linha preta corresponde à variabilidade interanual; e os pontos vermelhos representam a variabilidade intra-anual. Ponto 1.

Figura 22 - Resíduo interanual no ponto 3.



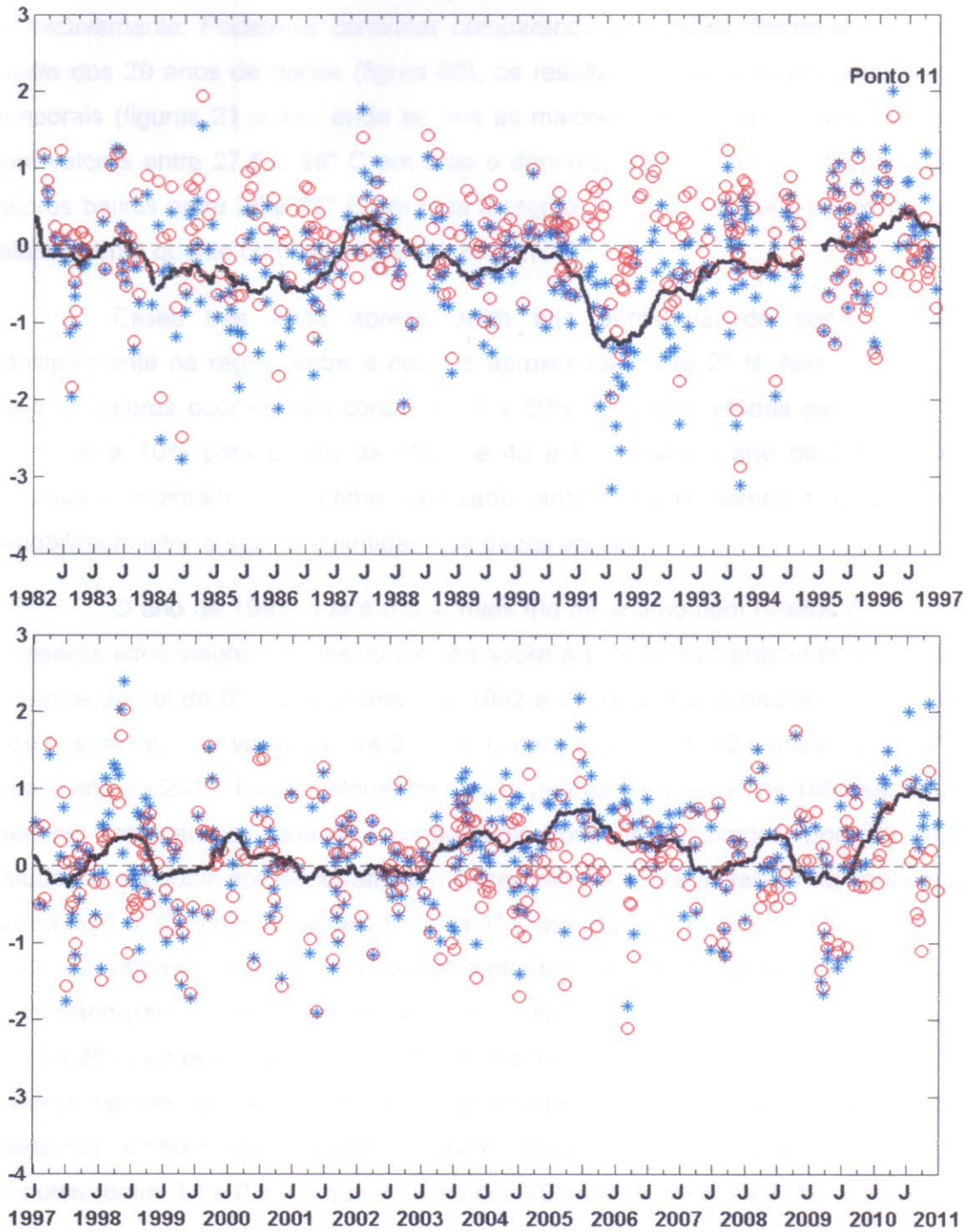
Fonte: a autora. Os pontos azuis correspondem ao resíduo R1, depois de que o ciclo determinístico foi subtraído dos dados originais. A linha preta corresponde à variabilidade interanual; e os pontos vermelhos representam a variabilidade intra-anual. Ponto 3.

Figura 23 - Resíduo interanual no ponto 9.



Fonte: a autora. Os pontos azuis correspondem ao resíduo R1, depois de que o ciclo determinístico foi subtraído dos dados originais. A linha preta corresponde à variabilidade interanual; e os pontos vermelhos representam a variabilidade intra-anual. Ponto9.

Figura 24 - Residuo interanual no ponto 11.



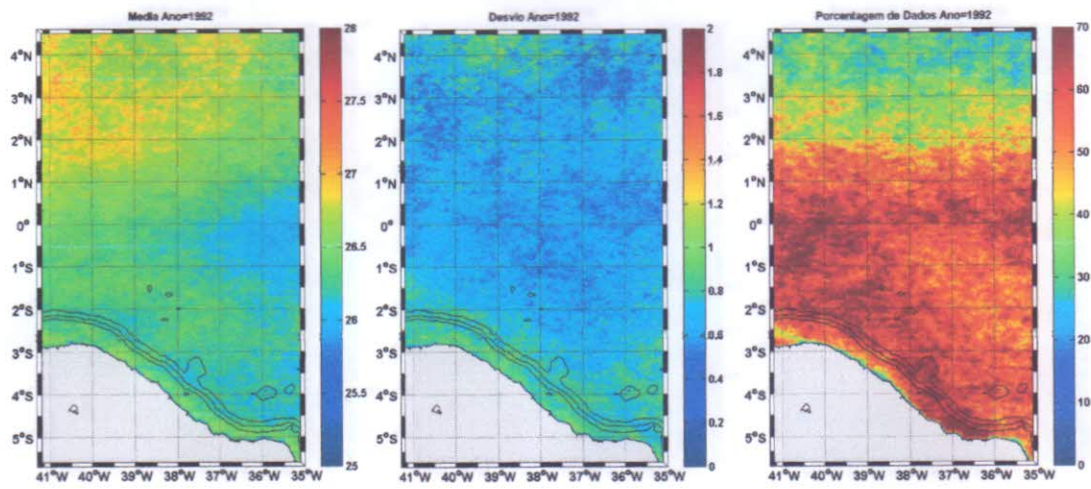
Fonte: a autora. Os pontos azuis correspondem ao residuo R1, depois de que o ciclo determinístico foi subtraído dos dados originais. A linha preta corresponde à variabilidade interanual; e os pontos vermelhos representam a variabilidade intra-anual. Ponto11.

Exemplos de médias da TSM, desvio padrão e porcentagem de dados para os anos 1991, 1992 e 2010, são apresentados nas figuras 25, 26 e 27, respectivamente. Podem-se confirmar comparando as médias destes anos com a média dos 29 anos de dados (figura 03), os resultados apresentados pelas séries temporais (figuras 21 a 24), onde se tem as maiores médias para o ano de 2010, com valores entre 27,5 e 28° C em todo o domínio. Já o ano de 1991 apresentou valores baixos entre 25 e 26° C em toda a região. Por fim, em 1992 temos um ano relativamente quente com valores entre 26 e 27° C.

Esses três anos apresentaram alto percentual de dados válidos, principalmente na região entre a costa e aproximadamente 2° N. Nessa região os maiores valores ocorrem em cerca de 50 a 60% de dados válidos para o ano de 1991, 60 a 70% para o ano de 1992, e 40 e 60% para o ano de 2010. Estes resultados mostram que como apontado anteriormente também existe uma variabilidade inter-anual na quantidade de dados válidos.

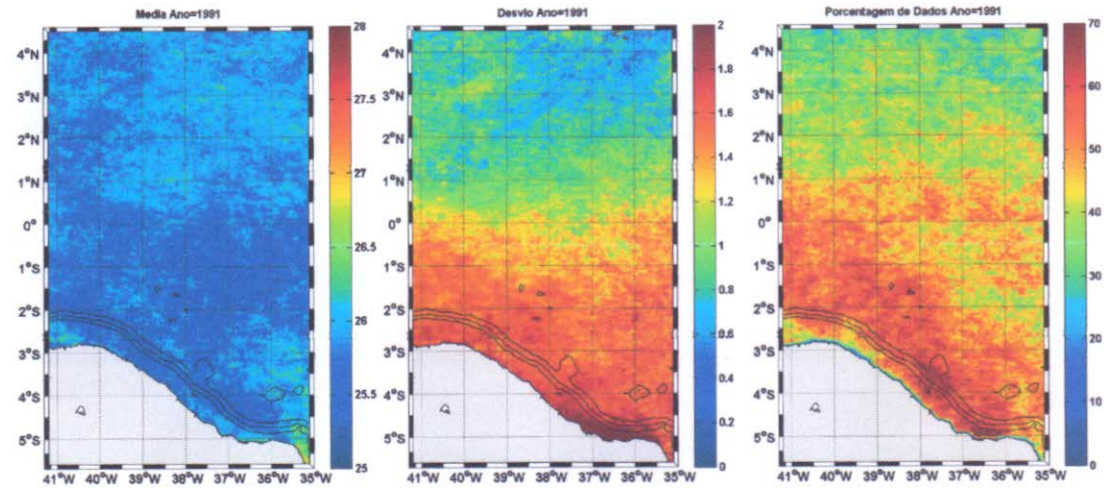
O ano de 1991, que é o ano mais frio de acordo com nossos resultados, apresenta altos valores de desvio padrão sobre a plataforma continental e a região oceânica ao sul de 0°. Para os anos de 1992 e 2010, o desvio padrão é menor em todo o domínio, com valores entre 0,6 e 1° C para o ano de 1992 e entre 0,6 e 1,4° C para o ano de 2010. Esses valores de desvio padrão para o ano de 1991 são muito menores comparados quando comparados com os resultados dos 29 anos estudados, os quais apresentaram os maiores valores sobre a plataforma continental (cerca de 1,5° C), com variações de 0,7 a 1° C em regiões oceânicas. Para o ano de 1992, os valores de desvio padrão encontrados são bem maiores que o desvio encontrado para os 29 anos, com valores de até 2° C desde a costa até 0,5° N. O ano de 2010 apresentou desvio padrão semelhante ao desvio dos 29 anos, com os maiores valores sobre a plataforma continental e menores valores em regiões oceânicas, embora nessa região os valores para o ano de 2010 sejam um pouco menores (entre 0,4 e 0,6° C) que a média dos 29 anos (entre 0,8 e 1° C).

Figura 25 - Média de TSM, desvio padrão e porcentagem de dados válidos no ano de 1991.



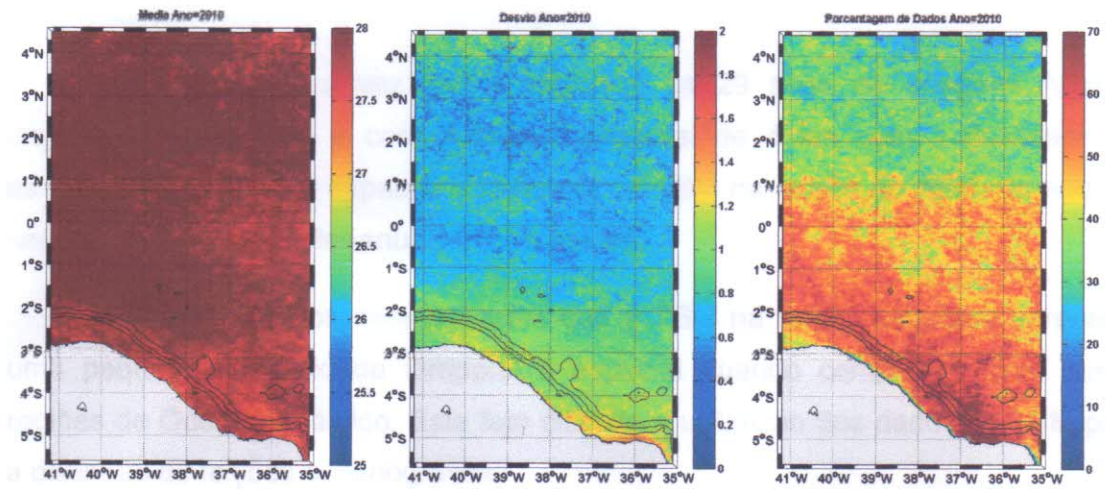
Fonte: a autora.

Figura 26 - Média de TSM, desvio padrão e Percentual de dados válidos para o ano de 1992.



Fonte: a autora.

Figura 27 - Média de TSM, desvio padrão e porcentagem de dados válidos no ano de 2010.



Fonte: a autora.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

Pela primeira vez foram utilizados os 29 anos de imagens AVHRR disponíveis livremente e com resolução espacial de 4 km com a finalidade de estudar a variabilidade espacial e temporal de TSM na região do ASE em escalas anuais, semi-anuais, inter-anuais e intra-anuais.

Os resultados demonstraram que a TSM na região estudada apresenta uma pequena variabilidade temporal e espacial quando comparada com outras regiões do Oceano Atlântico. Este fato dificulta a utilização dos dados de TSM para a distinção de feições oceanográficas.

A média de TSM no ASE é entre 26,5 e 27,5 ° C. As amplitudes do ciclo anual são entre 0,5 a 1,5 ° C, com os valores mais elevados ocorrendo no interior da plataforma continental. O máximo de TSM ocorre no início de março dentro da plataforma continental e no final de março sobre as regiões oceânicas. A variabilidade inter-anual explica 30-40% da variância não-determinista da TSM. A variância restante foi explicada pela variabilidade intra-anual. A maior parte da TSM é explicada pelo ciclo anual seguido pelas variações intra-anuais. Usando a média de TSM e os harmônicos anuais e semi-anuais, mostrou-se de forma pioneira que é possível reconstruir cerca de 70% da variância total da TSM dentro da plataforma continental no ASE.

Embora nossos métodos não permitam quaisquer inferências sobre a escala de tempo que contribui para a variabilidade inter-anual e intra-anual, o trabalho nos forneceu uma visão geral da distribuição espacial e a importância relativa destes componentes para o sinal total de TSM.

O conjunto de dados de TSM versão 5.2 do *Pathfinder* forneceu uma fonte de alta resolução espacial e temporal, o que, combinado com a metodologia de pixel-a-pixel aqui apresentados, permitiu apresentar alguns processos oceanográficos associados à TSM não previamente examinados na região.

No futuro espera-se que os estudos da TSM sejam feitos em uma região maior para abranger outros fenômenos oceanográficos como os anéis e vórtices da Corrente Norte do Brasil e a influência destes na variabilidade da TSM no Oceano

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, R. V. *et al.* A influência da temperatura da superfície do mar dos oceanos pacífico e atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, p 113-122, 2004.
- BOMVENTI, T. N.; WAINER, I. K. C.; TASCHETTO, A. S. Relação entre a radiação de onda longa, precipitação e temperatura da superfície do mar no oceano atlântico tropical. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 513-524, 2006.
- CARTON, J. A.; ZHOU, Z. 1997: Annual cycle of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v.102, p. 27813–27824.
- CASEY, K.S.*et al.* "The Past, Present and Future of the AVHRR Pathfinder SST Program", em "Oceanography from Space: Revisited", edição V. Barale, J.F.R. Gower, and L. Alberotanza, Springer. 2010.
- CLAUZET, G.; WAINER, I; SERVAIN, J. A variabilidade oceânica e atmosférica na região do Atlântico Tropical nos dados da rede PIRATA a partir de análise de ondeletas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.1, p 43-58, 2005.
- DEWITT, D. G., EDWIN, K. S. Diagnosing the Annual Cycle Modes in the Tropical Atlantic Ocean Using a Directly Coupled Atmosphere–Ocean GCM. **Journal Climate**, v 19, p 5319–5342, 2006.
- EMERY, W.J; THONSOM, R.E. **Data analysis Methods in Physical Oceanography**. Pergamon Press, 1 edição, 1998.
- FRATANTONI, D. M.; GLICKSON, D. A. North Brazil Current Ring Generation and Evolution Observed with SeaWiFS. **Journal of physical oceanography**, vol. 32, p 1058-1074, 2001.
- FREITAS, L. B.; KAMPEL, M. Estimativa da temperatura da superfície do mar a partir de dados do satélite METEOSAT Second Generation. Em: III Congresso Brasileiro de Oceanografia (CBO) 2010, **Anais...** Rio Grande –RS. Artigos, CD-ROM.
- LACERDA, L. D.; MARINS, R.V. Geoquímica de sedimentos e monitoramento na plataforma continental nordeste oriental do Brasil. **Geochemica Brasiliensi**, 20(1)p.123-135, 2006.
- LEITE, M. D. A. *et al.* Descrição das variabilidades nas anomalias de TSM de 1985 a 2005 para a porção noroeste do Atlântico Sul.Em: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) 2011, **Anais...** Curitiba, PR, Brasil, INPE p.7160.
- LENTINI, C. A. D.; CAMPOS, E. J. D.; PODESTA, G. G. The annual cycle of satellite derived sea surface temperature on the western South Atlantic shelf. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 48, n. 2, pp. 93-105, 2000.

MARIN, F. O. **A Subcorrente Norte do Brasil ao largo da Costa do Nordeste**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de oceanografia física) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MELO, A. B. C.; NOBRE, P.; MENDES, D.; BOTTINO, M. J. A zona de convergência intertropical sobre o oceano atlântico: climatologia. Em: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, **Anais...**Foz de Iguaçu-PR, p 682-686.

REYNOLDS, R. W. Impact of Mount Pinatubo aerosols on satellite-derived sea surface temperatures. **Journal Climate**, vol. 6, p 768–774, 1993.

RODRIGUES, R.R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. **Journal of Physical Oceanography**, v 37, p 16-30, 2007.

SARAVANAN, R.; CHANG, P. Interaction between Tropical Atlantic Variability and El Niño–Southern Oscillation. **American Meteorological Society**, v. 13, p. 2177- 2194, 2000.

SERVINO, R. N. **Variabilidade interanual das propriedades dinâmicas da corrente do Brasil e sua relação com o ENSO**. Monografia (Graduação em Oceanografia)- Centro de Ciências Humanas e Naturais. Departamento de Oceanografia e Ecologia, Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2011.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, Vol 104, p 863-883. 1999.

TEIXEIRA, C. E. P. **Análise objetiva da temperatura da superfície do mar no Atlântico Sul Ocidental a partir de imagens AVHRR/NOAA**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Física, Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande do Sul, 2003.

TEIXEIRA, C.E.P.; LENTINI, C.A.D; MATA, M.M.; GARCIA, C.A.E; CAMPOS, E.J.D. On the temporal variability of the sea surface temperature in the Southwestern Atlantic based on the analysis of Pathfinder AVHRR/NOAA images. Em: **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, p. 1-10, 2009.