



UFC
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

VICTÓRIA ESTHER TERRINHA LUZ

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA DA
SUPERFÍCIE DO MAR VIA SATÉLITE AQUA/MODIS E AS TEMPERATURAS
MEDIDAS IN SITU PELAS BÓIAS METEO-OCEANOGRÁFICAS DO PROJETO
PIRATA**

FORTALEZA

2021

VICTÓRIA ESTHER TERRINHA LUZ

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA DA
SUPERFÍCIE DO MAR VIA SATÉLITE AQUA/MODIS E AS TEMPERATURAS
MEDIDAS IN SITU PELAS BÓIAS METEO-OCEANOGRÁFICAS DO PROJETO
PIRATA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado apresentado à Coordenação da Graduação do Curso de Oceanografia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L994e Luz, Victória.
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR VIA SATÉLITE AQUA/MODIS E AS TEMPERATURAS MEDIDAS IN SITU PELAS BÓIAS METEO-OCEANOGRÁFICAS DO PROJETO PIRATA / Victória Luz. – 2021.
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira.
1. Bóias PIRATA. 2. Sensor MODIS. 3. TSM. 4. Satélites. 5. Bóias Meteo-oceanográficas. I. Título.
CDD 551.46
-

VICTÓRIA ESTHER TERRINHA LUZ

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA DA
SUPERFÍCIE DO MAR VIA SATÉLITE AQUA/MODIS E AS TEMPERATURAS
MEDIDAS IN SITU PELAS BÓIAS METEO-OCEANOGRÁFICAS DO PROJETO
PIRATA

Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado apresentado à Coordenação da Graduação do Curso de Oceanografia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira (Orientador)
Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Msc. Ana Beatriz Leite Cavalcante
EOLLAB- Laboratório de Observação da Terra
Brasil- Colaboradora

Msc. Tatiana Beltrão
Pesquisadora no Laboratório de Ecologia Marinha
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Margarete Terrinha, minha avó, Neli de Paula, e a Marlena Dias, meus exemplos de força e ternura, por todo apoio e amor.

À Tia Tânia, que dedicou a vida para fazer bem ao próximo, plantou o Projeto Cariúnas, semeou o amor por meio da música e da arte, com o propósito de uma sociedade mais sensível e humana, e deixou esse mundo com um legado: como é fácil amar... Todo meu carinho, amor e eterna gratidão.

A todos os meus amigos de BH, que mesmo com a distância sempre estiveram por perto deixando meus dias mais leves. Em especial ao Davidson Pierre e a Carollita.

A meus amigos, Marimar, Ari e Hugo, que estiveram comigo nessa caminhada, meus dias no Labomar não seriam os mesmos sem vocês.

Ao meu professor Pedro Calixto, por toda paciência, companheirismo, didática e ajuda de sempre.

Ao meu orientador e professor, Antônio Geraldo, por toda a paciência, tranquilidade e direcionamento neste projeto. Profissional que ama o que faz e na primeira aula de sensoriamento remoto despertou em mim a admiração pela oceanografia física.

A todos os funcionários da UFC, sem vocês nada disso seria possível.

Ao Thomas Daniel, melhor amigo e parceiro de todos os momentos...

“O mar não é um obstáculo: é um caminho.”

(Amyr Klink)

RESUMO

O sensor MODIS acoplado no satélite AQUA realiza medidas superficiais da temperatura do oceano, enquanto que as bóias fundeadas do Projeto PIRATA fazem medições pontuais desde a superfície até 500 m de profundidade. Devido a importância da validação de dados *in situ* e dados derivados de satélite, o presente estudo buscou identificar até qual profundidade é encontrada uma boa correlação ($r > 0,7$) entre a TSM AQUA/MODIS e as medidas pelas boias PIRATA a diversas profundidades. Para a realização desse trabalho, dados da temperatura de superfície e subsuperfície de 1998 a 2018, medidos por 17 bóias ATLAS do Projeto Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA), foram utilizados, além da TSM derivada de satélite. Após a remoção dos *outliers*, estatísticas básicas foram calculadas com o objetivo de obter a correlação dos dados da boia PIRATA x AQUA/MODIS. Através dos cálculos realizados, foi possível identificar que as melhores correlações pertencem à região das bóias no Atlântico a sudoeste do Equador, enquanto que as piores ficam dispostas a noroeste. Ademais, gráficos de termoclina foram gerados para o mesmo período, indicando a possível influência da Zona de Confluência dos Alísios (ZCA) e, conseqüentemente, da ZCIT, na região oeste do Atlântico Equatorial que é composta por camadas de mistura mais amplas. Gráficos mensais de termoclina foram realizados para 4 bóias na radial 38°W, possibilitando verificar o impacto da migração sazonal da ZCIT durante os diferentes meses do ano.

Palavras-chave: Oceanografia Física. Bóias meteo-oceanográficas. AQUA/MODIS. Projeto Pirata.

ABSTRACT

The MODIS sensor coupled to the AQUA satellite performs surface measurements of the ocean temperature, while the anchored buoys of the PIRATA Project make point surface measurements up to 500 m in depth. Due to the importance of validating data in situ and data derived from satellite, the present study sought to identify to what depth a good correlation is found, considered above 0.7. For the realization of this project, data of the surface and subsurface temperature from 1998 to 2018 measured by 17 ATLAS buoys of the Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA) Project were obtained, in addition to satellite-derived TSM. After removing anomalous values, statistical measures were calculated in order to obtain the correlation. Therefore, it was possible to identify that the best correlations belong to the buoys region in the Atlantic, southwest of Ecuador, while the worst are to the northwest. In addition, thermocline graphs were performed for the same period, identifying that due to the influence of the Trade Confluence Zone (ZCA) and, consequently, the ZCIT, the western region of the Equatorial Atlantic is composed of the broadest mix layers. Monthly thermocline charts were made for 4 buoys at 38°W, allowing the observation of the vertical movement of the ZCIT during the different months.

Keywords: Physical Oceanography. Meteo-oceanographic buoys. AQUA/MODIS. PIRATA Project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Ilustração do Satélite AQUA	18
Figura 2	- Bóia PIRATA	19
Figura 3	- Localização das bóias PIRATA utilizadas no presente estudo	21
Figura 4	- Perfis verticais de temperatura para as bóias: 15° N – 38° W; 12° N – 38° W; 19° S – 34° W; 4° N – 38° W; 0° N – 23° W; 0° N – 35° W; 5° S – 10° W; 6° S – 10° W.	43
Figura 5	- Perfis verticais de temperatura para as bóias: 8° N – 38° W; 0° N – 0° E; 0° N – 10° W; 10° S – 10° W; 12° N – 23° W; 14° S – 32° W; 20° N – 38° W; 21° N – 23° W.	44
Figura 6	- Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 20° N – 38° W	46
Figura 7	- Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 15° N – 38° W	48
Figura 8	- Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 8° N – 38° W	49
Figura 9	- Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 4° N – 38° W	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 10° S - 10° W.	26
Gráfico 2	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 8° S - 30° W.	26
Gráfico 3	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 12° N - 23° W	27
Gráfico 4	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 10° W	27
Gráfico 5	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 0° E	27
Gráfico 6	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 8° N - 38° W	28
Gráfico 7	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 4° N - 38° W	28
Gráfico 8	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 4° N - 23° W	29
Gráfico 9	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 12° N - 38° W	29
Gráfico 10	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 14° S - 32° W	29
Gráfico 11	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 19° S - 34° W	30
Gráfico 12	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 20° N - 38° W	30
Gráfico 13	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 23° W	31
Gráfico 14	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 35° W	31
Gráfico 15	- Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 6° S - 10° W	32

Gráfico 16 – Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos <i>in situ</i> pela bóia PIRATA nas coordenadas 21° N - 23° W	32
Gráfico 17 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (10° S – 10° W), e a reta de regressão linear.	33
Gráfico 18 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (10° S – 10° W), e a reta de regressão linear.	33
Gráfico 19 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (8° S – 30° W), e a reta de regressão linear	33
Gráfico 20 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (8° S – 30° W), e a reta de regressão linear.	33
Gráfico 21 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (19° S – 34° W), e a reta de regressão linear	34
Gráfico 22 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (19° S – 34° W), e a reta de regressão linear	34
Gráfico 23 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (6° S – 10° W), e a reta de regressão linear	35
Gráfico 24 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (6° S – 10° W), e a reta de regressão linear	35
Gráfico 25 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (14° S – 32° W), e a reta de regressão linear	35
Gráfico 26 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (14° S – 32° W), e a reta de regressão linear	35
Gráfico 27 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 0° E), e a reta de regressão linear.	35
Gráfico 28 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 0° E), e a reta de regressão linear.	35
Gráfico 29 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 10° W), e a reta de regressão linear.	36
Gráfico 30 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 10° W), e a reta de regressão linear.	36
Gráfico 31 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 35° W), e a reta de regressão linear.	37

Gráfico 32 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 35° W), e a reta de regressão linear.	37
Gráfico 33 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	37
Gráfico 34 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (0° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	37
Gráfico 35 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (4° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	38
Gráfico 36 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (4° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	38
Gráfico 37 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (4° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	38
Gráfico 38 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (4° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	38
Gráfico 39 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (8° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	39
Gráfico 40 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (8° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	39
Gráfico 41 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (12° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	40
Gráfico 42 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (12° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	40
Gráfico 43 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (12° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	40
Gráfico 44 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (12° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	40
Gráfico 45 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (15° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	41
Gráfico 46 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (15° N – 38° W), e a reta de regressão linear.	41
Gráfico 47 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (21° N – 23° W), e a reta de regressão linear.	41

- Gráfico 48 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (21° N – 23° W), e a reta de regressão linear 41
- Gráfico 49 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (20° N – 38° W), e a reta de regressão linear 41
- Gráfico 50 – Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA (20° N – 38° W), e a reta de regressão linear 41

LISTA DE TABELAS

Tabela	Faixas Espectrais para resoluções espaciais do sensor MODIS	22
1	- Localização e período dos dados das bóias PIRATA utilizadas	23
Tabela	- Dados estatísticos de cada bóia	57
2	- Métricas de erros em superfície para todas as bóias	63
Tabela		
3		
Tabela		
4		

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PIRAT	Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic
A	
ZCIT	Zona de Convergência InterTropical
HS	Hemisfério Sul
HN	Hemisfério Norte
ZCA	Zona de Confluência dos Alísios
TSM	Temperatura de Superfície do Mar
ME	Erro Médio
MAE	Erro Médio Absoluto
RMSE	Raíz Quadrada do Erro Médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Sensor MODIS	18
1.2	Projeto PIRATA	19
2	OBJETIVO GERAL	20
2.1	Objetivos Específicos	20
3	ÁREA DE ESTUDO	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Aquisição de Dados	21
4.1.1	Dados do satélite AQUA/MODIS	21
4.1.2	Dados das bóias PIRATA	22
4.2	Tratamento dos dados - Remoção de valores negativos	23
4.3	Análise Estatística	24
4.3.1	Análise de erros	25
4.3.1.1	ME - Erro médio	25
4.3.1.2	.MAE -Erro médio absoluto	25
4.3.1.3	RMSE - Raiz quadrada do erro médio	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1	Séries Temporais	26
5.2	Regressão Linear	33
5.3	Termoclina	42
5.3.1	Variação Sazonal	46
6	CONCLUSÕES	53
7	REFERÊNCIAS	55
8	APÊNDICES	57
8.1	APÊNDICE A	57
8.2	APÊNDICE B	63

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de parâmetros físicos, químicos, geológicos e biológicos do oceano é realizado por meio de uma gama de instrumentos, podendo ser acoplados principalmente em bóias oceanográficas, navios, satélites ou lançados ao mar. O modelo *in situ* conta com algumas dificuldades como pequena mobilidade e grandes escalas temporais necessárias para a realização da coleta sistemática de dados em amplas áreas do oceano (Souza, 2003). O sensoriamento remoto é um conjunto de técnicas que permite obter dados sobre objetos à superfície terrestre sem que haja contato direto, e ocorre através da interação com a radiação. A oceanografia espacial realiza o monitoramento por meio de satélites, que apesar das intempéries, como cobertura de nuvens que bloqueiam o campo de visão em faixas específicas do espectro eletromagnético, possuem campo de visão abrangente e alta resolução espacial e temporal, além de facilidade em coletar dados de forma sistemática.

Dentre os parâmetros monitorados está a temperatura do oceano em superfície (TSM) e profundidade. Devido aos diversos métodos de medição (satélites ou *in situ*), em diferentes níveis da estrutura térmica próximo da superfície do oceano, valores de TSM podem sofrer variações em décimos de Kelvin (Robinson, 2010). A camada superficial do oceano, camada skin, é medida por radiômetros infravermelhos acoplados em satélites. Logo abaixo, a pouca distância (1mm), encontra-se a camada sub-skin, alguns décimos de grau mais quente, medida por radiômetros micro-ondas.

Bóias fundeadas, que monitoram uma gama de parâmetros de interação oceano-atmosfera, são instrumentos *in situ*, que medem níveis superficiais e subsuperficiais, chegando a 500 metros de profundidade. Diferente dos radiômetros acoplados em satélites, nas bóias fundeadas as medidas são pontuais.

Este trabalho busca contribuir para a validação de dados de TSM estimados pelo sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) no Atlântico Intertropical. Para atingir este objetivo os dados MODIS serão comparados com dados das boias do Projeto PIRATA (Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic), que medem, *in situ*, a temperatura da água do mar desde a superfície até 500 m de profundidade. A TSM medida pelo satélite será comparada com a temperatura medida pelas boias PIRATA a diversas profundidades com o objetivo de verificar até que profundidade a TSM AQUA/MODIS representa a temperatura das primeiras camadas do oceano. Para auxiliar nesse processo a termoclina oceânica, na região de cada boia, será gerada, e análises estatísticas e índices de erro serão utilizados.

1.1 Sensor MODIS

O sensor MODIS (espectrorradiômetro de imagem de resolução moderada) é um instrumento a bordo dos satélites TERRA e AQUA, dos quais fazem parte do programa Earth Observation System (EOS) realizado pela NASA. O AQUA foi o primeiro de sete satélites do grupo denominado inicialmente de A-Train a ser lançado. Diante disso, a missão tem como objetivo o estudo multidisciplinar do ciclo da água na Terra, e interações entre atmosfera, oceano e continente. Suas principais aplicações estão voltadas para a obtenção de dados da umidade atmosférica, avaliação de propriedades físicas das nuvens, monitoramento e estudo das mudanças climáticas, temperatura da superfície da terra e por fim, temperatura da superfície do oceano, parâmetro estudado neste trabalho.

O instrumento MODIS, um dos seis acoplados no satélite de órbita heliosíncrona AQUA, lançado ao espaço no ano de 2002, está operando em uma órbita de 700 km de altura, com resolução espacial de 250 a 1000 m. Com comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm , ele possui em 36 canais espectrais que cobrem as porções visível e infravermelho (próximo e termal). Em conjunto ao satélite TERRA, que também leva a bordo o sensor MODIS, possui cobertura global da superfície da Terra de 1 a 2 dias e campo de visada de 2330 km. Ademais, o conjunto de suas capacidades técnicas fazem do MODIS importante sensor para o estudo e entendimento dos processos que ocorrerem na superfície da Terra (FREITAS, KAMPEL E LORENZZETTI, 2017).

Figura 1 - Ilustração do Satélite Aqua.



Fonte: NASA.

1.2 Projeto PIRATA

O Projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA), implantado em 1997, é um projeto de oceanografia operacional executado em colaboração multinacional entre Brasil, França e Estados Unidos. A rede de bóias PIRATA é composta por bóias fundeadas no Atlântico Intertropical e são construídas pelo *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) da NOAA (National and Oceanic Atmospheric Administration). O PIRATA realiza monitoramento dos parâmetros físicos *in situ* no Atlântico com o objetivo de adquirir dados que possibilitem melhorar o conhecimento e o entendimento da interação oceano-atmosfera, que impactam, por exemplo, no clima da região nordeste do Brasil e Oceano Atlântico Adjacente.

Figura 2 - Bóia PIRATA



Fonte: Projeto PIRATA Northeast Extension (PNE), NOAA.

As bóias, *Autonomous Temperature Line Acquisition System* (ATLAS), que compõem o projeto são semelhantes às utilizadas na rede TAO no Pacífico Equatorial, e realizam medições de vento em superfície, condutividade de superfície, condutividade de subsuperfície até 500 m, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiações de ondas curtas, precipitação, pressão a 300 e 500 m e temperatura da superfície do oceano e de subsuperfície até 500 m. Os dados são coletados e transmitidos diariamente para o sistemas de satélite Argos. Entre os

dados obtidos, os de alta resolução armazenados internamente são recuperados anualmente no decorrer das manutenções das bóias (<http://www.goosbrasil.org/pirata/>).

Extensões foram realizadas após alguns anos da implementação do projeto com o objetivo de monitorar e auxiliar na compreensão de efeitos importantes que levam a variabilidades climáticas no Brasil. Bóias foram fundeadas nas regiões da Zona de Convergência do Atlântico Sul, onde ocorre um forte mecanismo de interação termodinâmica; na Zona de Convergência Intertropical do Atlântico Sul, onde ocorrem gradientes horizontais de TSM e divergência dos ventos, e duas bóias foram implementadas em aproximadamente 8°S e 30°W; e na advecção de vórtices da Corrente Sul Equatorial, na região das correntes de contorno oeste (<http://pirata.ccst.inpe.br/pt/extensao-sudoeste/>).

Na França a Météo-France , CNRS (Le Centre national de la recherche scientifique) e IFREMER (Institut Français de Recherche Pour L'exploitation de la Mer), no Brasil o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação Marinha do Brasil) e nos EUA NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) são instituições envolvidas no Projeto PIRATA. Ademais, os dados podem ser obtidos de maneira gratuita por meio dos sites (<https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/> e www.funceme.br).

2 OBJETIVOS

A seguir apresentamos o objetivo geral e os específicos propostos para este trabalho.

2.1 Objetivo Geral

Correlacionar estimativas de TSM por satélite com dados *in situ*, medidos pelas bóias meteo-oceanográficas do projeto PIRATA, em diversas profundidades.

2.2 Objetivos Específicos

Criar um banco de dados das medidas *in situ* de temperatura da água do mar a diversas profundidades realizadas pelas bóias PIRATA no oceano Atlântico.

Gerar séries temporais da temperatura medida pelo sensor MODIS nas proximidades das boias PIRATA.

Gerar séries temporais da temperatura medida pelas bóias PIRATA sensor MODIS nas proximidades das bóias PIRATA, distribuídas na região do Atlântico entre as latitudes de 21° N e 19° S e longitudes de 38° W a 0° E.

Correlacionar os dados do satélite AQUA/MODIS com dados *in situ* das bóias PIRATA
Gerar gráficos de termoclina na área das bóias do projeto PIRATA.

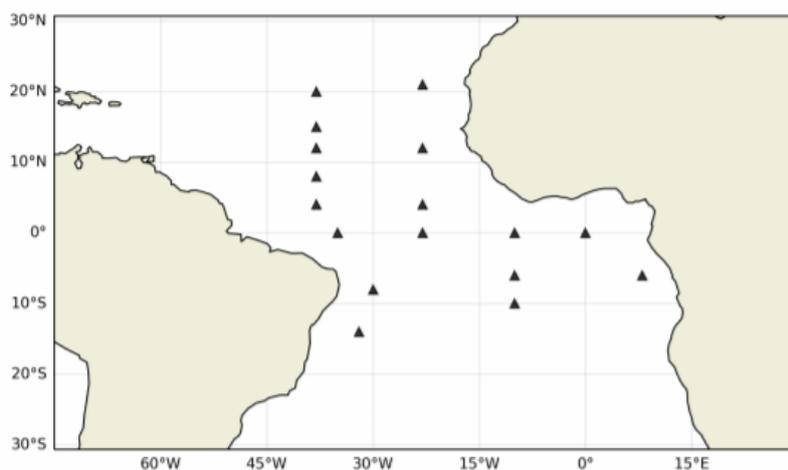
Estudar o comportamento da termoclina na radial 38°W onde estão localizadas as bóias PIRATA 4° N 38° W, 8° N 38° W, 15° N 38° W e 20° N 38° W.

3 ÁREA DE ESTUDO

O estudo compreende a região do Atlântico Intertropical entre as latitudes 21° N e 19° S e as longitudes 38° W e 0° E. A área foi considerada por conter as bóias do Projeto PIRATA que serão utilizadas neste trabalho.

Por conta da alta taxa de incidência da radiação, a região Equatorial possui TSMs com maior magnitude se comparada a outras regiões oceânicas. Diante disso, a temperatura superficial do oceano nessa área possui influência nas trocas de massas e energia do oceano, além de contribuir para a precipitação nas regiões continentais adjacentes (SEAGER et al., 2010). Além do mais, o Atlântico Equatorial comporta a variação sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que será investigada neste estudo, por possuir relação com as altas TSMs e mudanças nas amplitudes da camada de mistura do oceano.

Figura 3: Localização das bóias PIRATA utilizadas no presente estudo.



Fonte: VIANA, 2018.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados para realização deste trabalho e a metodologia de análise dos mesmos são apresentados nos itens a seguir.

4.1 Aquisição de Dados

Os itens 4.1.1 e 4.1.2 descrevem dados de satélite e das boias PIRATA e como foram adquiridos.

4.1.1 Dados do satélite AQUA/MODIS

Os dados de TSM AQUA/MODIS foram obtidos via ftp (file transfer protocol) através do site: <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/las/UI.vm>. Para a delimitação da coleta de dados nas áreas próximas às medidas pontuais das bóias foram utilizados dados dos pixels mais perto das coordenadas das bóias (distância Euclidiana).

O sensor MODIS possui 36 faixas espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm . As 7 primeiras faixas se iniciam na região do visível e seguem até o infravermelho médio. A resolução espacial varia de 250 m a 1000 m, a última trabalha com as 27 bandas espectrais restantes. Para realizar as estimativas de TSM são utilizadas as bandas 22 e 23 (3,959 a 4050 μm) de ondas curtas e 31 e 32 (10,78 a 11,28 e 11,77 a 12,27 μm) de ondas longas que são utilizadas durante o dia (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod28.php>).

Tabela 1. Faixas Espectrais para resoluções espaciais do sensor MODIS .

Nº das Bandas	Faixa Espectral (μm)
1	Azul- 0,459 – 0,479
2	Verde- 0,545 – 0,565
3	Vermelho- 0,620 – 0,670
4	Infravermelho Próximo- 0,841 – 0,876
5	Infravermelho Médio- 1,230 – 1,250
6	Infravermelho Médio- 1,628 – 1,652
7	Infravermelho Médio- 2,105 – 2,155
8 a 36	0,405- 14,385

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Dados das bóias PIRATA

A média dos dados mensais foram coletados entre os anos de 1998 a 2018 para as 17 bóias do Projeto PIRATA analisadas neste estudo. As bóias se encontram entre as latitudes 21°N a 19°S e longitudes 38°W e 0°E. Os dados foram obtidos por meio do site (<https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/>) da NOAA e baixados em formato ASCII e NetCDF.

Na Tabela 2 encontram-se discriminadas a localização das bóias (latitudes e longitudes) e o período de dados obtidos.

Tabela 2. Localização e período dos dados das bóias PIRATA utilizados.

Bóia	Latitude	Longitude	Período de coleta de dados
1	0° N	0° E	11/1998 - 10/2018
2	0° N	10° W	08/1999 - 10/2018
3	0° N	23° W	03/1999 - 10/2018
4	0° N	35° W	01/1998 - 10/2018
5	10° S	10° W	09/1997 - 10/2018
6	12° N	23° W	06/2006 - 10/2018
7	12° N	38° W	02/1999 - 10/2018
8	14° S	32° W	08/2005 - 10/2018
9	15° N	38° W	01/1998 - 10/2018
10	19° S	34° W	09/2005 - 10/2018
11	20° N	38° W	05/2007 - 10/2018
12	21° N	23° W	05/2007 - 10/2018
13	4° N	23° W	06/2006 - 10/2018
14	4° N	38° W	03/2000 - 10/2018
15	6° S	10° W	03/2000 - 10/2018
16	8° N	38° W	01/1998 - 10/2018
17	8° S	30° W	08/2005 - 10/2018

Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Metodologia

A metodologia de análise dos dados é apresentada a seguir.

4.2.1 Tratamento dos dados - Remoção de valores negativos

Para os cálculos de valores mínimos, máximos, médias, desvios padrões, correlações (R de Pearson) e coeficientes de determinação (R^2), além dos gráficos de regressão e de série temporal, foi realizada uma filtragem nos dados para retirar valores considerados outliers, temperaturas com valores negativos que são geradas por ocorrência de algum defeito no sensor que impossibilitou a medição correta da variável temperatura da água do mar.

4.2.2 Dados relativos à termoclina

Os perfis verticais de temperatura para a identificação da termoclina foram gerados a partir de rotinas computacionais utilizando a linguagem de programação Python. Foram geradas médias de toda a série histórica de temperatura, das boias PIRATA, desde a superfície até a profundidade de 500 m.

Para as boias PIRATA, localizadas na radial 38° W, os dados de termoclina foram gerados a partir dos valores da série histórica. Médias foram calculadas para cada mês de todos os anos com dados disponíveis. O Objetivo foi o estudar o comportamento mensal e sazonal da termoclina na área de atuação da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical).

4.3 Análise Estatística

Para a análise estatística foram calculados valores para a média, desvio padrão, correlação linear de Pearson e de regressão. A média, valor central de um conjunto de dados, foi estabelecida como:

$$\mu = \frac{\sum Xi}{n},$$

μ , equivale à média; $\sum Xi$, o somatório de todos os valores; e n , a quantidade de valores.

O desvio padrão, medida que tem o objetivo de demonstrar a variabilidade dos dados e determinar o nível de desvio do estabelecido valor da média, foi calculado como :

$$\sigma = \sqrt{\sum(Xi - \mu)^2/n}$$

onde o σ , equivale ao desvio padrão; Xi , todos os valores; μ , média; e n , a quantidade de valores.

O coeficiente de correlação, é um dos principais métodos estatísticos utilizados para a determinação da correlação entre variáveis, que tem como objetivo a observação de como uma variável X age em um panorama com outra variável Y presente, e a relação da variação de uma de acordo com a variação da outra. É, portanto, a quantificação da relação entre as variáveis. Ainda nesse contexto, a correlação de Pearson, também conhecida como correlação linear, apresenta o nível de correlação de maneira quantitativa entre duas variáveis por meio de valores que vão de -1 (correlação inversa/negativa) a 1 (correlação linear positiva). Desse modo, valores próximos a -1 ou 1, representam forte correlação, e valores próximos a 0, correlação fraca, $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $r = 0,40$ até $0,6$ (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte) (Dancey e Reidy, 2005) e podem ser calculados a partir de:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{xi - \bar{X}}{sx} \right) \left(\frac{yi - \bar{Y}}{sy} \right)$$

Cálculo para o coeficiente de determinação R^2 :

$$R^2 = \text{corr}(y,x); \quad (\text{ARAUJO, 2009}).$$

Ainda nesse contexto, foram realizadas medidas de regressão linear, na qual foi utilizada a seguinte equação:

$$Y = \alpha + \beta \cdot X,$$

Y , é a variável dependente, medida da temperatura da superfície do mar (TSM) registrada pelo sensor MODIS. X é a variável independente, equivalente a medida de temperatura registrada pelas bóias PIRATA em determinada profundidade. Portanto, a equação de regressão foi estabelecida como:

$$tsm_{sat} = \beta \cdot tsm_{boia} + \alpha ,$$

em superfície, e:

$$tsm_{sat} = \beta \cdot temp20_{boia} + \alpha ,$$

a 20 m de profundidade.

4.3.1 Análise de erros.

Os índices de erro utilizados neste trabalho foram calculados de acordo com Pielke, 1984.

4.3.1.1 ME - Erro médio

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (\varnothing_i - \varnothing_{iObs})}{N}$$

4.3.1.2 MAE - Erro médio absoluto

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |\varnothing_i - \varnothing_{iObs}|}{N}$$

4.3.1.3 RMSE - Raiz quadrada do erro médio

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varnothing_i - \varnothing_{iObs})^2}{N}}$$

onde \varnothing_i representa o dado estimado pelo satélite e \varnothing_{iObs} os dados medidos in situ pelas boias PIRATA.

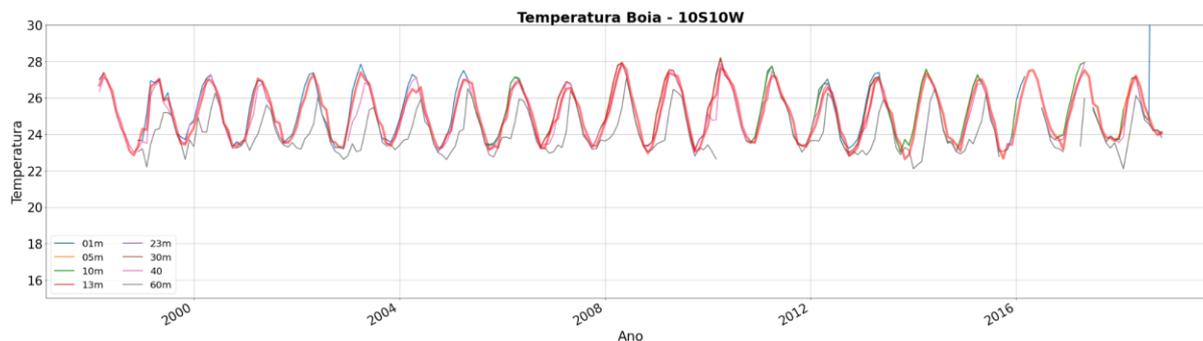
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão serão apresentados os resultados obtidos e discutir à luz da bibliografia que trata do escopo deste trabalho.

5.1 Séries Temporais

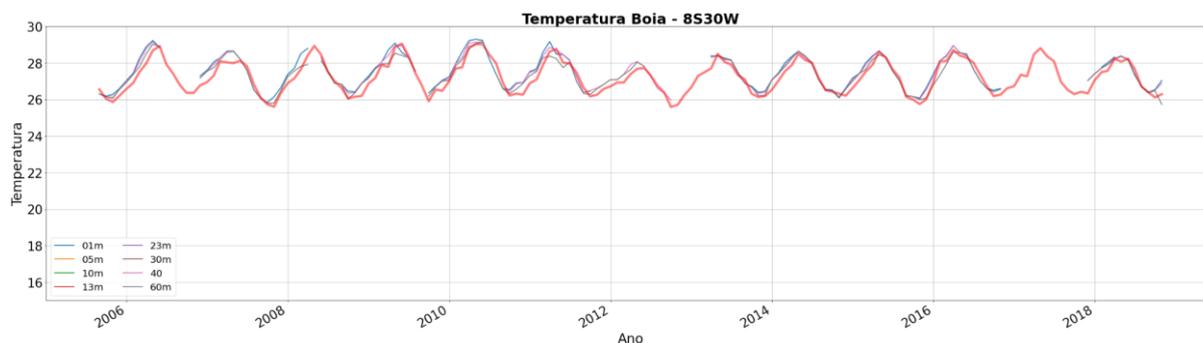
Com o objetivo de verificar até qual profundidade é possível obter uma boa correlação entre temperaturas medidas pelas bóias PIRATA e dados gerados por meio de imagens de TSM estimadas através do satélite AQUA/MODIS, os gráficos a seguir foram gerados.

Gráfico 1. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 10° S - 10° W.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 2. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 8° S - 30° W.

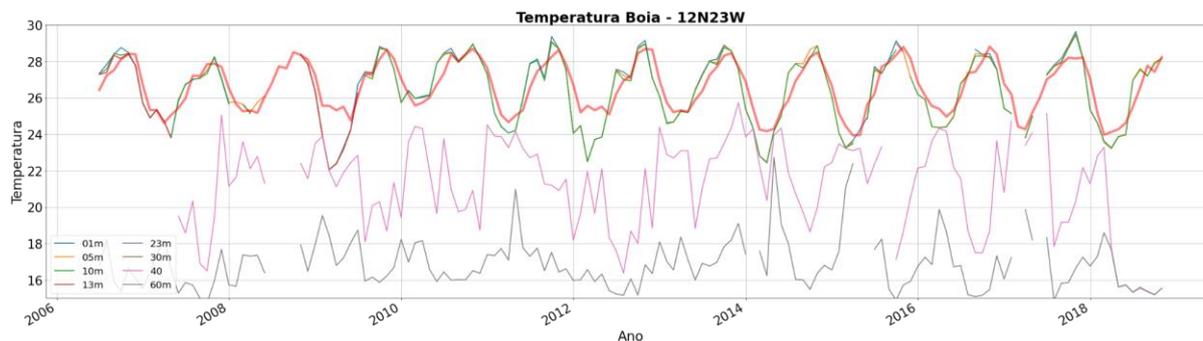


Fonte: Elaborado pela autora.

As duas bóias 10° S-10° W e 8° S - 30° W (Gráficos 1 e 2) demonstram uma ótima concordância entre os dados derivados de satélite e *in situ*. Entretanto, é possível observar que em determinados anos, como 2003 a 2006 e aproximadamente 2012 a 2014 na bóia 10° S - 10° W, os dados de superfície medidos pela bóia PIRATA se apresentaram com temperaturas mais altas do que a TSM estimada pelo satélite. Fato semelhante ocorre a 8° S - 10° W em quase todo o período monitorado, exceto nos anos de 2013 a 2014 e 2017 a 2018 nos quais, possivelmente por problemas de manutenção do sensor que mede a temperatura, não foi possível obter dados das bóias, impossibilitando a continuação da verificação da tendência.

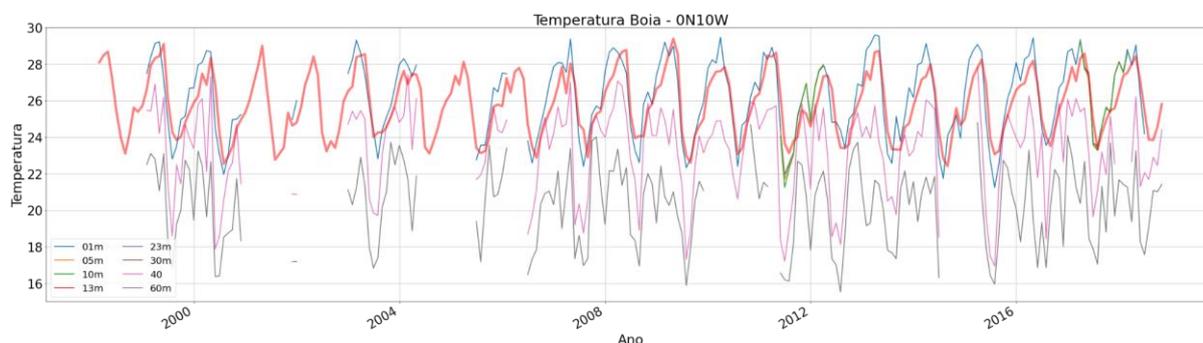
Para a bóia 10° S - 10° W o valor de correlação obtido foi de $r = 0,99$ para a superfície e para 20 m de profundidade, em 40 m metros a correlação foi de $r = 0,95$. Ambas as profundidades mantiveram alta correlação. A bóia 8° S - 30° W demonstrou um comportamento diferente mantendo uma boa correlação até os 60 m de profundidade, $r = 0,96$. O valor de r para as demais boias e profundidades estão relacionados no Apêndice A.

Gráfico 3. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 12° N - 23° W



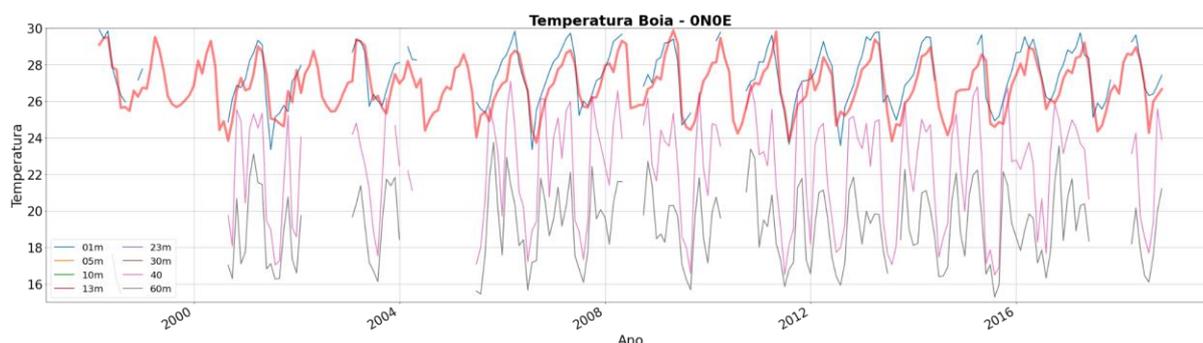
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 10° W



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 5. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 0° E



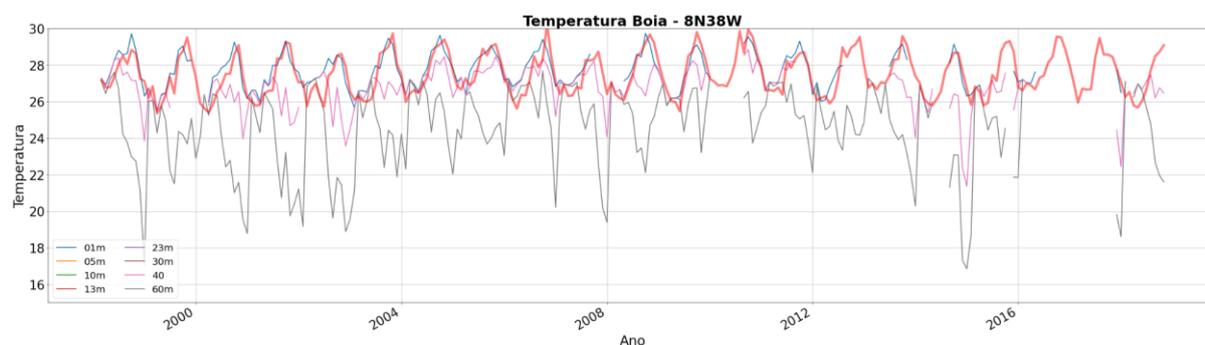
Fonte: Elaborado pela autora.

Por outro lado, para as bóias localizadas a 12° N- 23° W, 0° N 10° W e 0° N - 0° E (Gráficos 3, 4 e 5) as medidas de temperatura tendem a se distanciar da TSM derivada por satélite ainda nos primeiros metros da coluna de água, em praticamente todo o período registrado. Especialmente na bóia 12° N - 23° W, a 60 metros de profundidade, foi registrado

temperaturas em média 10°C menores em relação a TSM do satélite, o que pela profundidade era esperado.

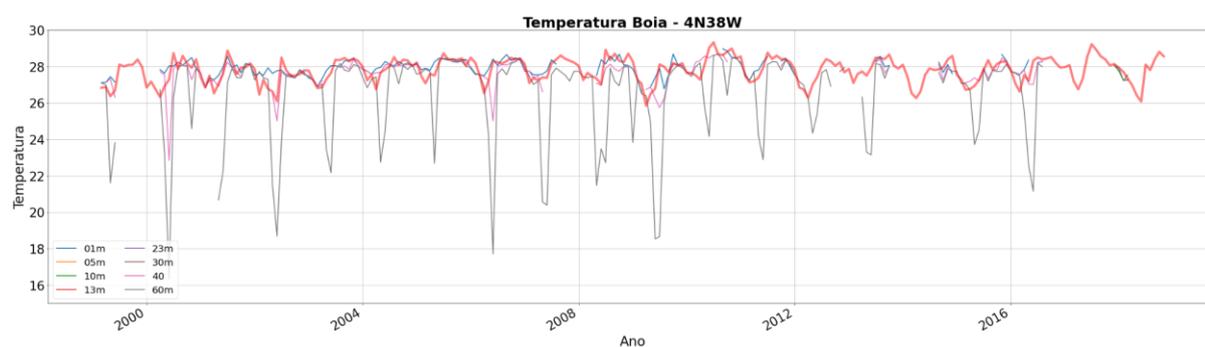
A bóia 12° N - 23° W manteve boa correlação até os 20 m ($r = 0,92$). Na profundidade de 40 m a correlação entre a TSM AQUA/MODIS e a boia foi baixa ($r = -0,34$). Para a bóia 0° N - 10° W a correlação se manteve significativa da superfície, $r = 0,98$, até os 40 metros de profundidade, $r = 0,79$. Em 60 m a correlação caiu para $r = 0,59$. A boia 0° N - 0° E se comportou de maneira semelhante. Verificou-se em superfície um $r = 0,96$, diminuindo de acordo com a profundidade, atingindo aos 40 m uma correlação fraca no valor de $r = 0,62$. O valor de r para as demais boias e profundidades estão relacionados no Apêndice A.

Gráfico 6. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 8° N - 38° W.



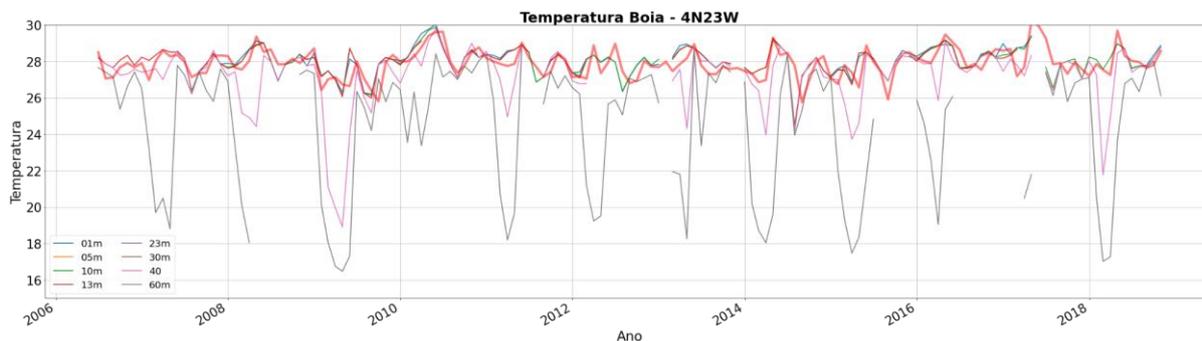
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 7. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 4° N - 38° W.



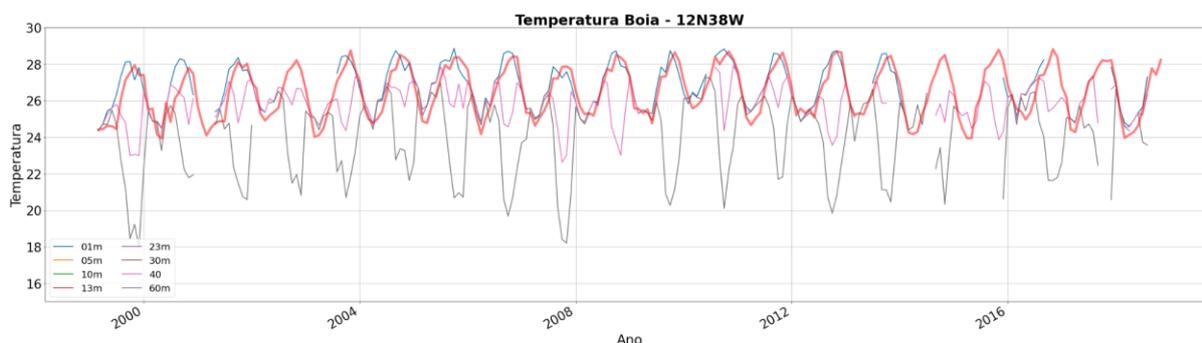
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 8. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 4° N - 23° W.



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 9. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 12° N - 38° W.

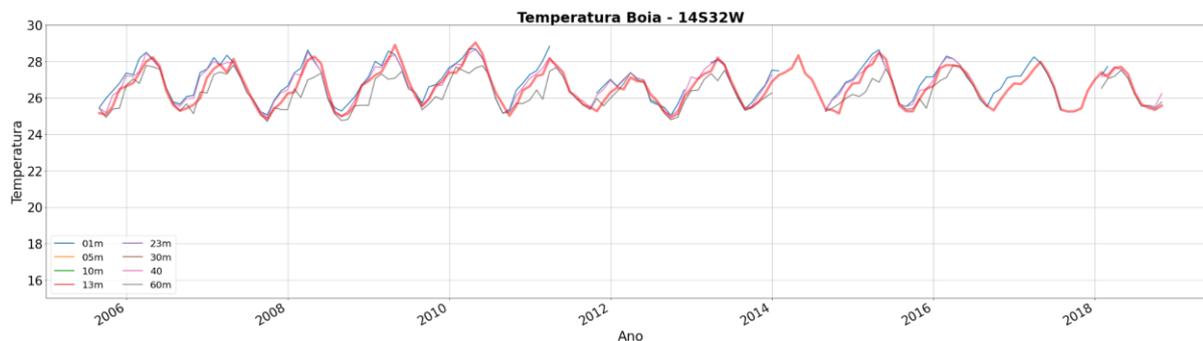


Fonte: Elaborado pela autora.

Para as localidades de 8° N - 38° W, 4° N - 38° W, 4° N - 23° W e 12° N - 38° W (Gráficos 6, 7, 8 e 9) foram observadas mudanças de temperatura significativas e bruscas nas profundidades de 40 metros para 60 metros, chegando a até aproximadamente 8 °C de diferença, como ocorreu no Gráfico 8 em 2007. Ademais, as bóias acima dos 23 metros de profundidade se mostraram pouco divergentes dos dados de TSM derivados do AQUA/MODIS.

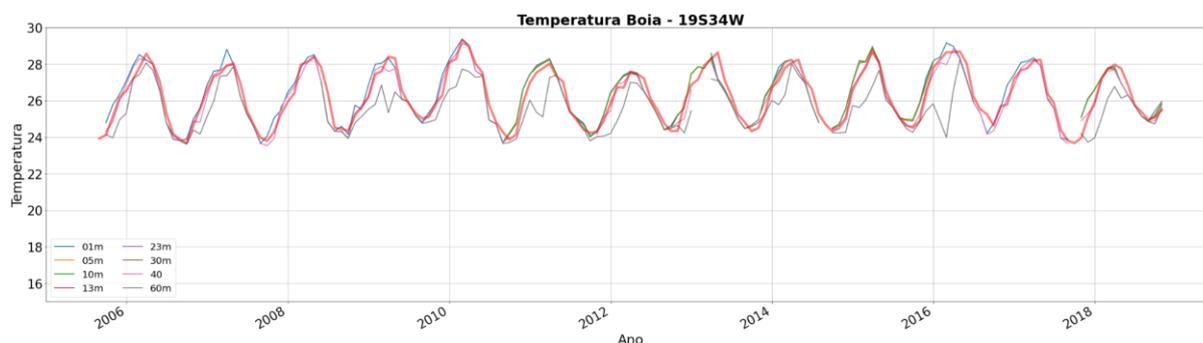
As bóias dos Gráficos 6, 7 e 8, apresentaram correlação semelhante com o aumento da profundidade. Para a bóia 4° N - 38° W, a correlação para dados de superfície e entre a superfície e 20 m foi de $r = 0,87$, e reduzindo aos 40 m para $r = 0,44$. O mesmo ocorreu para a bóia 12° N - 38° W, que apresentou o valor de $r = 0,94$ para as medidas em superfície e a 20 m de profundidade, e $r = 0,10$ aos 40 m. Embora a bóia 8° N - 38° W tenha demonstrado comportamento semelhante, a sua primeira redução, no valor da correlação, de um décimo, ocorreu entre a superfície e os 20 m de profundidade ($r = 0,93$).

Gráfico 10. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 14° S - 32° W.



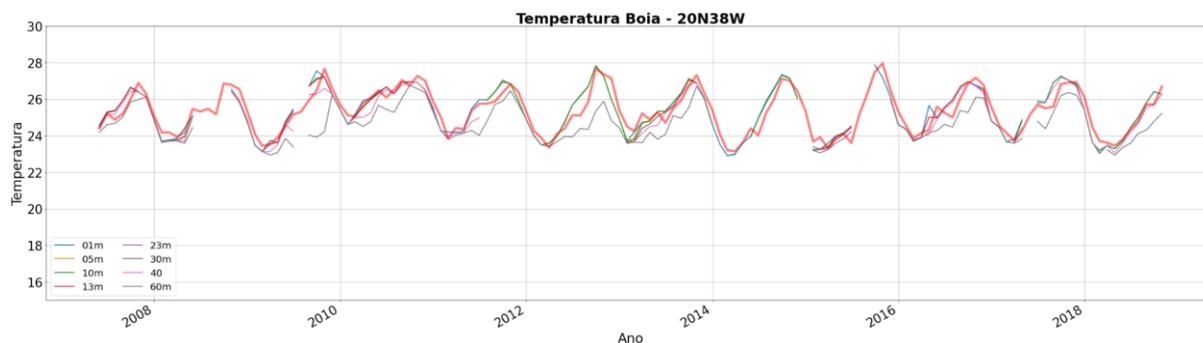
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 11. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 19° S - 34° W.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 12. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 20° N - 38° W



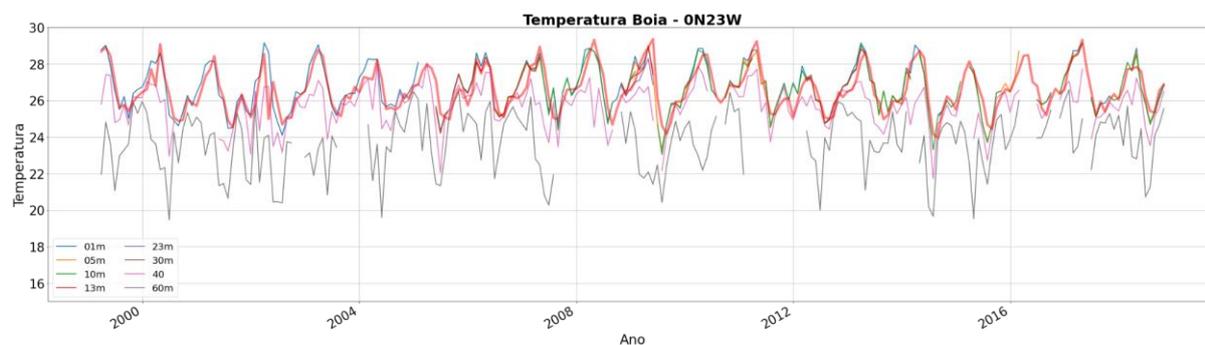
Fonte: Elaborado pela autora.

Para as localidades em 14° S - 32° W, 19° S - 34° W e 20° N - 38° W (Gráficos 10, 11 e 12) foram observadas pequenas divergências de temperatura quando comparados à TSM do satélite. Em 19° S - 34° W os dados demonstram ótima concordância para os anos de 2006 a 2009 e 2017, entretanto, para os outros anos e principalmente no primeiro trimestre de 2016,

em que foi observado uma queda de 4°C de temperatura em relação a TSM. Enquanto isso, para as localidades em 14° S - 32° W e 20° N - 38° W as divergências se mostraram entre 1 e 2°C.

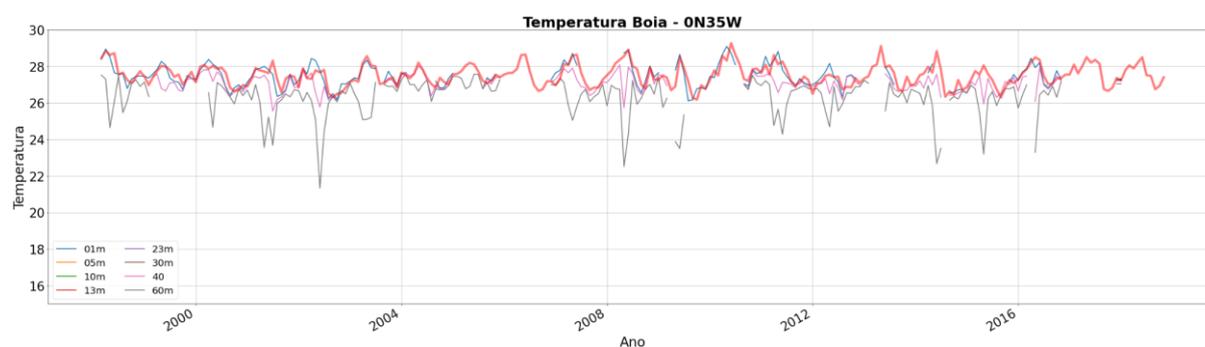
Os Gráficos 10, 11 e 12 se destacaram ao obter altas correlações entre a superfície até os 40 m de profundidade. A bóia 19° S - 34° W obteve $r = 0,99$ da superfície aos 20 m, e $r = 0,97$ aos 40 m; assim como a boia localizada em 14° S - 32° W que apresentou $r = 0,98$ até os 20 m, e $r = 0,97$ à profundidade de 40 m. A bóia 20° N - 38° W que demonstrou uma correlação de $r = 0,97$ entre a superfície e os 20 m de profundidade, além de $r = 0,94$ aos 40 m. Ademais, em ambas as bóias o r aos 60 m foi maior do que o limite de $r > 0,70$, que demonstra uma correlação significativa.

Gráfico 13. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 23° W



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 14. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 0° N - 35° W



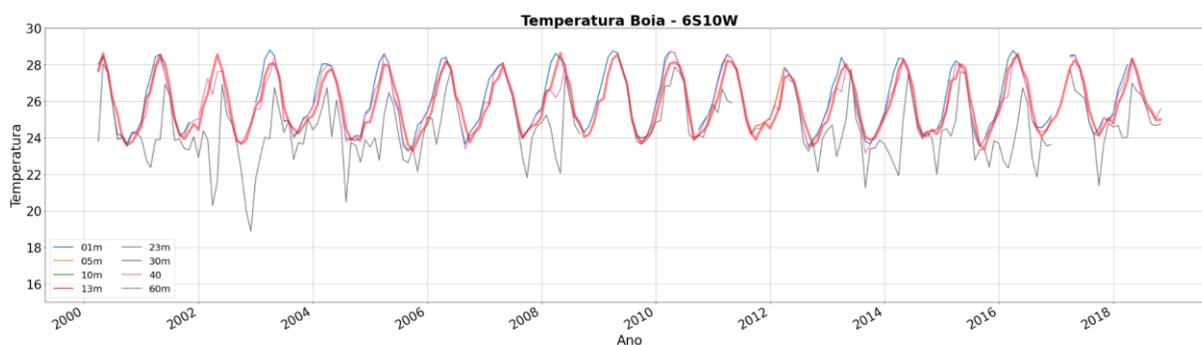
Fonte: Elaborado pela autora.

A bóia localizada a 0° N - 23° W demonstrou alta divergência, principalmente a 40 e 60 metros de profundidade, chegando a 8 °C de diferença quando comparada aos dados derivados

do satélite. Nas áreas mais superficiais, as temperaturas de superfície medidas pelo satélite apresentaram alguns décimos de grau menores do que as registradas pela bóia em superfície. Ainda nesse contexto, em 0° N - 35° W curtas variações de temperatura foram identificadas na superfície até 40 metros quando comparadas aos dados do sensor MODIS. Já a cerca de 60 metros de profundidade, divergências de aproximadamente 6 °C foram observadas, como em 2002. Entre 2003 e 2007 a variação da temperatura em relação a 60 metros de profundidade foi baixa quando comparada aos outros períodos.

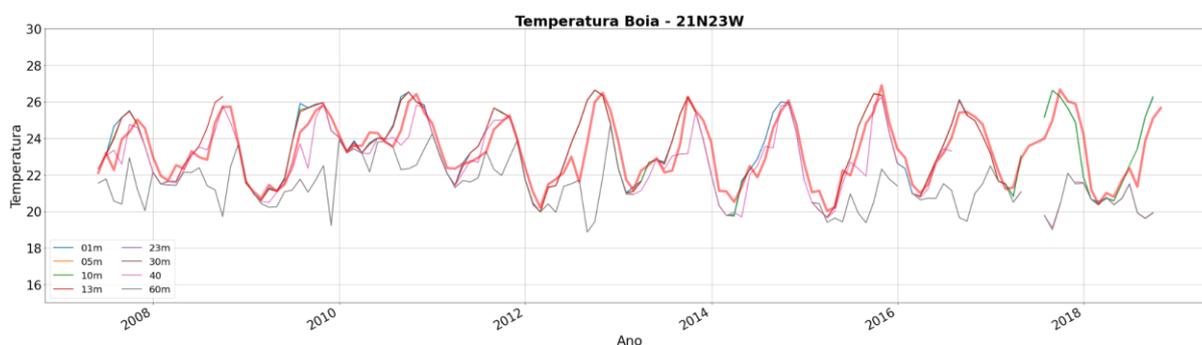
As correlações entre a temperatura superficial e em profundidade para as bóias 0° N - 23° W e 0° N - 35° W se mantiveram significativas até os 20 m de profundidade (Gráficos 13 e 14), com $r = 0,93$ e $r = 0,90$, respectivamente. Da superfície até os 40 m os valores de r variaram entre $r = 0,76$ e $r = 0,74$. A partir da profundidade de 60 m os valores de r se tornaram insignificantes.

Gráfico 15. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 6° S - 10° W



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 16. Série temporal estimada a partir do AQUA/MODIS (linha vermelha) e medidos *in situ* pela bóia PIRATA nas coordenadas 21° N - 23° W



Fonte: Elaborado pela autora.

Semelhante ao Gráfico 14, configura-se a bóia localizada em 6° S - 10° W. Entretanto, no ano de 2010 a temperatura a 60 metros demonstrou baixa diferença de temperatura em relação a TSM do satélite, não obstante por provável falha no equipamento da bóia não pôde ser acompanhada, tendo os dados retornados apenas em 2013. Na maior parte dos anos de 2000 a 2018 ocorreram picos de variação a 60 metros, chegando a 6 °C de diferença no ano de 2008. Em geral, os dados de satélite estiveram alguns décimos de graus mais baixos do que quando comparados às medidas de temperatura em superfície realizadas pela bóia.

Na localidade de 21° N - 23° W, observou-se na TSM do satélite medições inferiores a da bóia em superfície e a 13 metros de profundidade, chegando em alguns momentos, a ter uma temperatura alguns décimos menor do que a 40 metros de profundidade, podendo supor falha da bóia nas medições ou elaborações dos dados nessa profundidade e localidade. Ademais, a temperatura a 60 metros demonstrou cerca de 6° C abaixo da TSM, como no segundo semestre de 2012.

As correlações variam de maneira semelhante para ambas as bas, ou seja, para a boia na coordenada 6° S - 10° W a correlação da superfície até os 40 m de profundidade atingiu valores significativos, $r = 0,99$ da superfície aos 20 m, e $r = 0,96$ aos 40 m de profundidade. Para a coordenada 21° N - 23° W a correlação de foi de $r = 0,95$ (20 m) e $r = 0,64$ aos 40 m de profundidade.

Cabe destacar que, para todas as séries temporais apresentadas, foi possível identificar ciclos de variação de temperatura anuais com tendências a aquecimento no primeiro semestre, como nas bóias 10° S - 10° W e 8° S - 30° W, além de tendência a diminuição da temperatura, fato que ocorreu nos primeiros meses de todos os anos das bóias localizadas na longitude 38° W. Ademais, a concordância e as divergência de valores observados entre TSM estimada pelo AQUA/MODIS e as temperaturas das bóias até determinada profundidade podem ser verificadas por meio de resultados estatísticos obtidos que se encontram no Apêndice A.

5.2 Regressão Linear

Com o objetivo de analisar a variação das temperaturas do mar obtidas por meio das bóias PIRATA e a relação desta com os valores de TSM derivados do sensor MODIS, a seguir apresentamos os gráficos de dispersão AQUA/MODIS *versus* Boia PIRATA (em duas profundidades, sendo uma delas a TSM = 1m), e a regressão linear gerada para cada boia do Projeto PIRATA.

Gráfico 17. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (10° S – 10° W), e a reta de regressão linear.

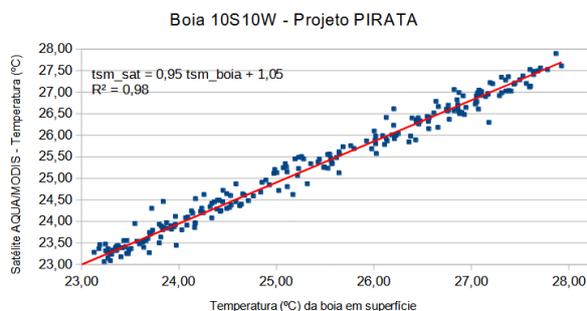


Gráfico 18. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (10° S – 10° W), e a reta de regressão linear..

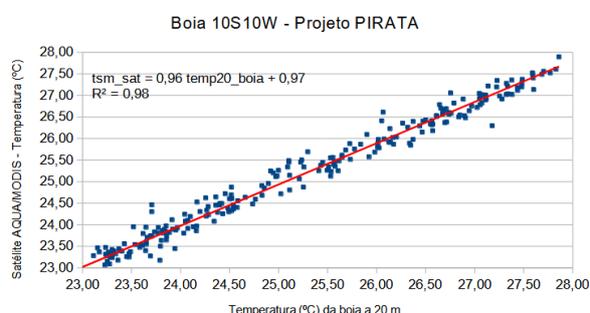


Gráfico 19. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (8° S – 30° W), e a reta de regressão linear.

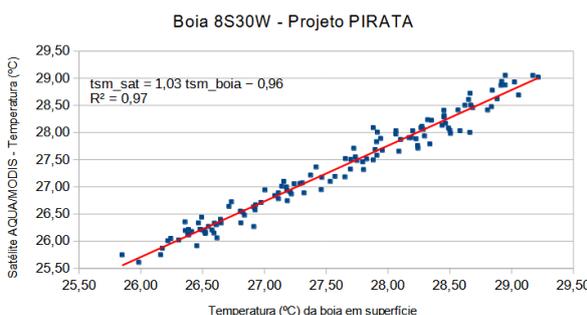
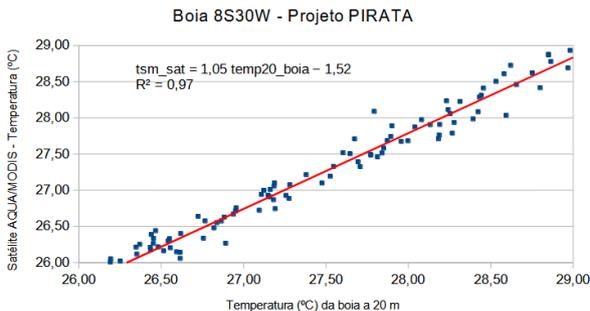


Gráfico 20. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (8° S – 30° W), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao calcular o coeficiente de correlação (r) de Pearson para as bóias 10° S - 10° W e 8° S - 30° W, os valores obtidos demonstraram forte correlação entre dados de TSM medidos por satélite e de superfície das bóias, assim como em dados PIRATA gerados em 20 m de profundidade. Levando em consideração que quanto mais próximo o R^2 é do 1, mais próxima é a taxa de variação entre as duas variáveis. Além do mais, a correlação em cada bóia foi mantida em ambas as temperaturas, com valores de $r = 0,99$ para 10° S- 10° W e $r = 0,98$ para a bóia 8° S- 30° W. Valores mínimos, máximos, médias e desvios padrões, assim como das correlações entre a TSM AQUA/MODIS e a temperatura medidas pelas boias, para diversas profundidades, podem ser encontrados no Apêndice A.

Os índices de erro entre os dados de TSM estimados pelo AQUA/MODIS e a bóia PIRATA, localizada na coordenada 10° S - 10° W, foram: ME= -0,11, MAE = 0,19 e RMSE =

0,24. Para a boia 8° S- 30° W os valores foram: ME -0,25, MAE = 0,26 e RMSE = 0,30. Esses índices de erro indicam a boa concordância entre as TSMs boia versus satélite.

A tabela com os índices de erro para todas as bóias se encontra no Apêndice B.

Gráfico 21. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (19° S – 34° W), e a reta de regressão linear.

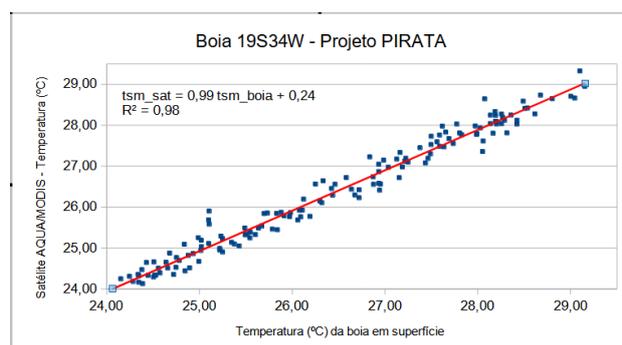


Gráfico 22. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (19° S – 34° W), e a reta de regressão linear.

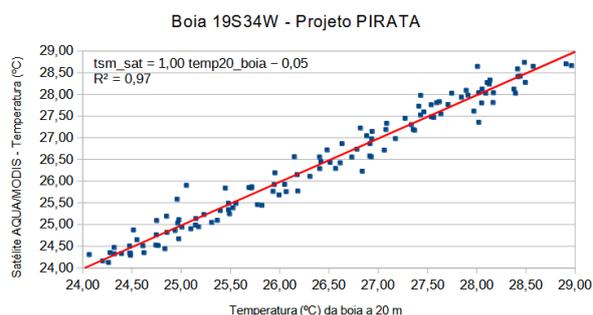


Gráfico 23. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (6° S – 10° W), e a reta de regressão linear.

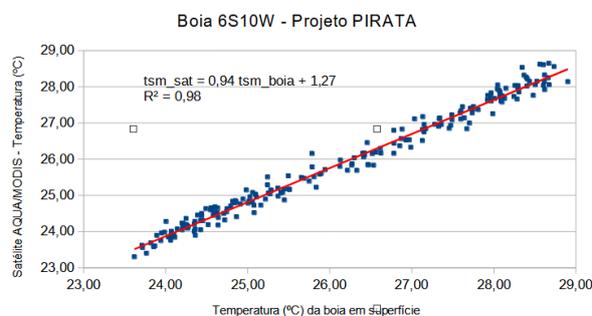
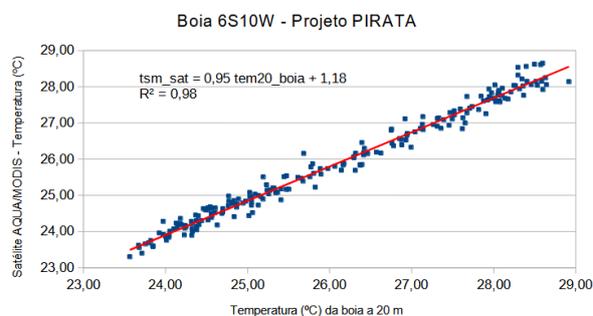


Gráfico 24. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (6° S – 10° W), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos Gráficos 21 a 24,, foram identificados, assim como anteriormente, forte correlação, porém na bóia 19° S - 34° W da superfície até 20 m de profundidade houve a queda de 1 décimo no valor do coeficiente de determinação R^2 , entretanto para o r em ambas as profundidades o valor permaneceu a $r = 0,99$. Assim como a alta correlação obtida em 19° W - 34° W, os erros se encontraram em valores reduzidos, -0,02 °C (ME), 0,23 °C (MAE) e 0,29 °C (RMSE). Os valores de métricas de erros para a bóia 6° S - 10° W foram: -0,25 °C (ME),

0,27 °C (MAE) e 0,33 °C (RMSE), indicando, assim como ocorrido na bóia 8° S- 30° W, baixas taxas de erro.

Gráfico 25. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (14° S – 32° W), e a reta de regressão linear.

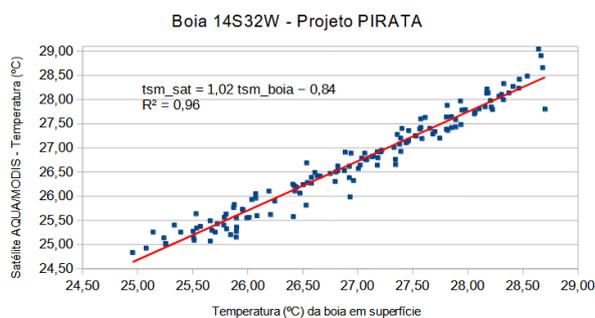


Gráfico 27. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 0° E), e a reta de regressão linear.

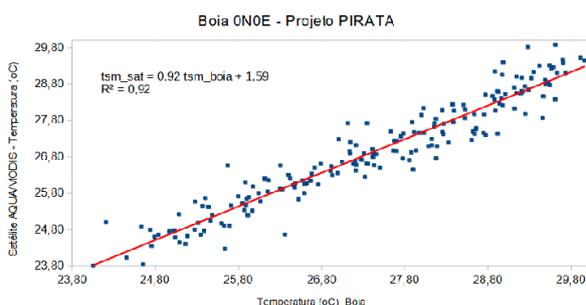


Gráfico 26. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (14° S – 32° W), e a reta de regressão linear.

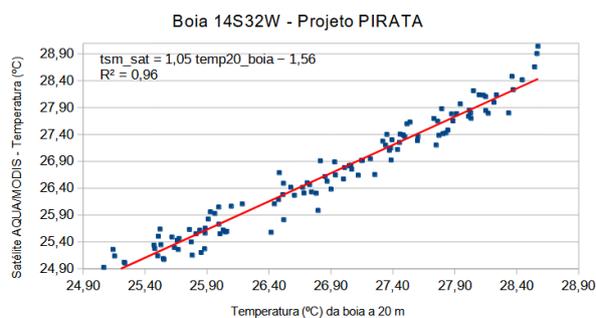
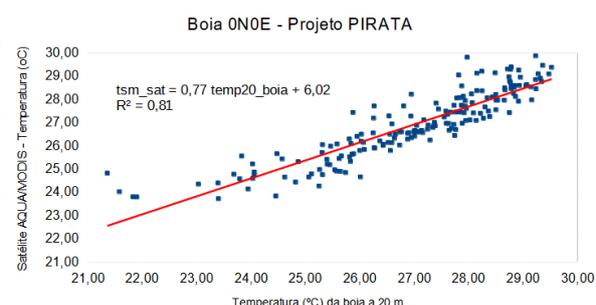


Gráfico 28. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 0° E), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

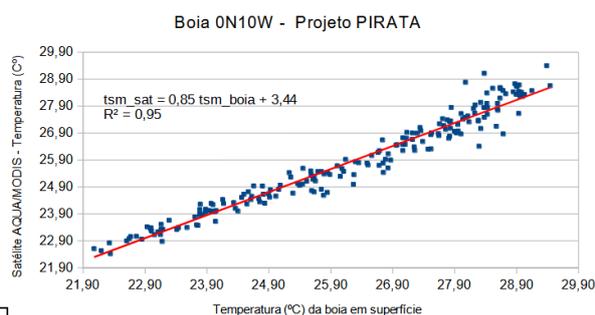
Nas localidades 0° N - 0° E e 14°S - 32°W, houve queda do R^2 quando comparado aos gráficos anteriores. Nos Gráficos 27 e 28 é possível identificar uma maior dispersão dos dados, além da diminuição de 9 décimos no valor do coeficiente de correlação de Pearson da superfície até 20 m. O mesmo ocorreu para a correlação r que para a superfície apresentou o valor de $r = 0,96$, mas para 20 m de profundidade o valor foi de $r = 0,90$, que devido a proximidade do valor 1, é considerado significativo.

Ainda, o valor mínimo encontrado para a bóia a 1 m de profundidade foi de 24,05 °C e o máximo de 29,96 °C, configurando um desvio da média no valor de 1,53 °C, variação de 5,58%, além de valor mínimo para a TSM do satélite de 23,73 °C e máximo de 29,88 °C, desviando cerca de 5,49% da média, ocasionando um $R^2 = 0,92$. Ademais, cabe ressaltar que os valores de métricas de erro identificados para essa bóia foram: -0,66 °C (ME), 2,41 °C

(MAE) e 2,74 °C (RMSE). Apesar de baixos, quando comparados aos valores obtidos pelas demais bóias são considerados altos e discrepantes.

Os valores do coeficiente de correlação r ultrapassaram em 2 décimos para ambas as profundidades em 14° N - 32° W. Contudo, obteve uma boa correlação até os 60 metros de profundidade, no qual o valor de R foi identificado como $r = 0,86$.

Gráfico 29. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 10° W), e a reta de regressão linear.



7

Gráfico 31. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 35° W), e a reta de regressão linear.

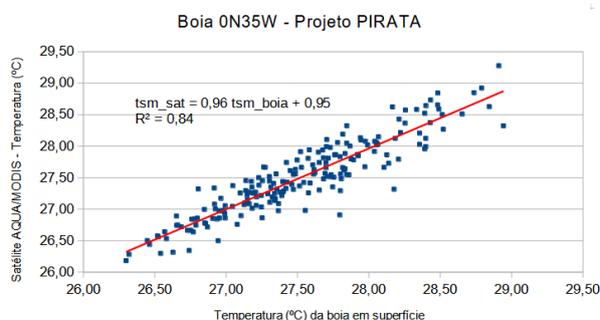


Gráfico 30. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 10° W), e a reta de regressão linear.

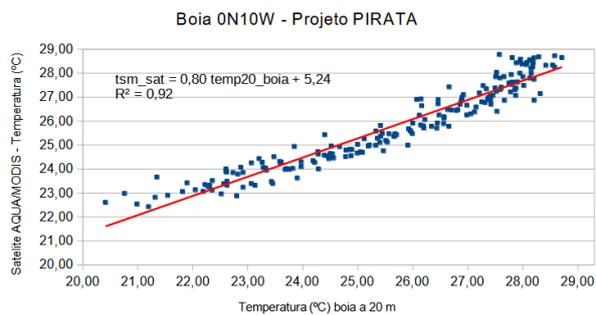
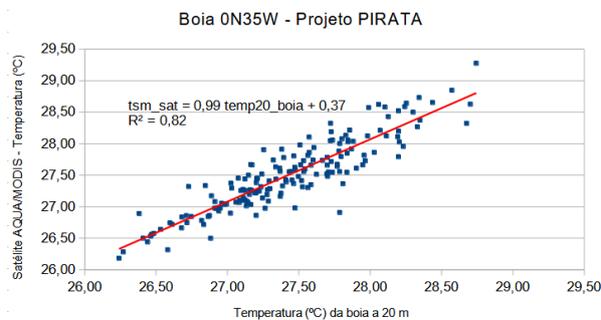


Gráfico 32. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 35° W), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como os gráficos anteriores, a correlação de Pearson se apresenta relativamente alta com tendência a queda de acordo com a profundidade. É possível observar nos gráficos 31 e 32 que os valores obtidos foram inferiores aos identificados nas bóias anteriores, demonstrando maior variação dos dados bóias *versus* satélite. Do mesmo modo, apresentou uma boa correlação somente até 40 metros de profundidade, constituindo o valor de R como 0,74.

Para ambas as bóias os resultados das métricas de erros permaneceram baixos. Ademais, a bóia 0° N – 35° W obteve valores mais reduzidos para os índices de erros de todas as bóias avaliadas.

Gráfico 33. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 23° W), e a reta de regressão linear.

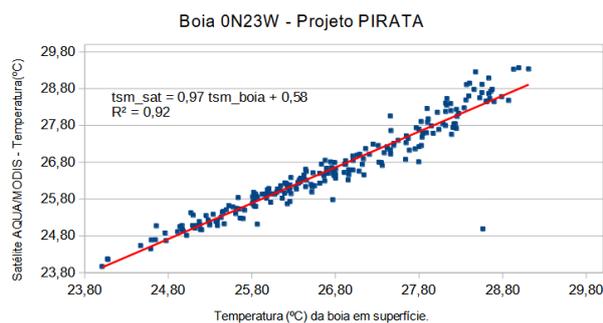


Gráfico 34. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (0° N – 23° W), e a reta de regressão linear.

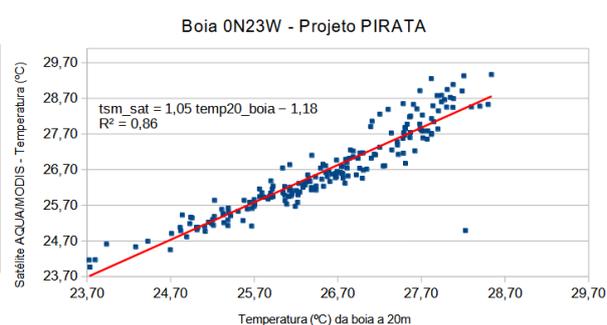


Gráfico 35. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (4° N – 23° W), e a reta de regressão linear.

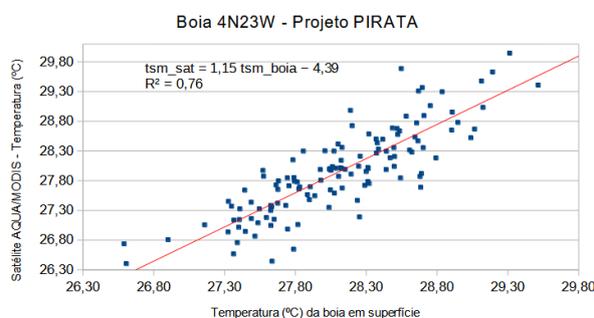
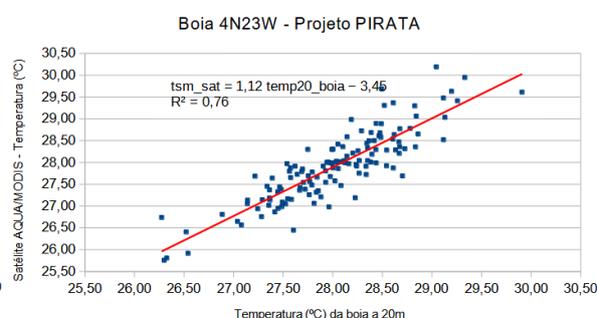


Gráfico 36. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (4° N – 23° W), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

O coeficiente de determinação R^2 da temperatura de superfície medidas por meio da bóia e satélite em 0° N – 23° W obteve o valor de $R^2 = 0,92$, enquanto que a temperatura a 20m de profundidade relacionada ao satélite obteve o valor igual a $R^2 = 0,86$, demonstrando redução da correlação de acordo com a profundidade. Entretanto, os valores de correlação (r) medidos são considerados fortes.

Para os dados na localidade 4° N – 23° W, as correlações medidas na superfície e a 20 m de profundidade obtiveram o mesmo valor. Embora a falta de redução do R^2 com a

profundidade, este se apresentou relativamente baixo $R^2 = 0,76$, quando considerado valores de R^2 acima de 0,7. Para a mesma localidade os valores encontrados de correlação foram identificados como $r = 0,87$ em ambas as profundidades.

Os valores dos índices de erro foram semelhantes e reduzidos para ambas as localidades.

Gráfico 37. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (4° N – 38° W), e a reta de regressão linear.

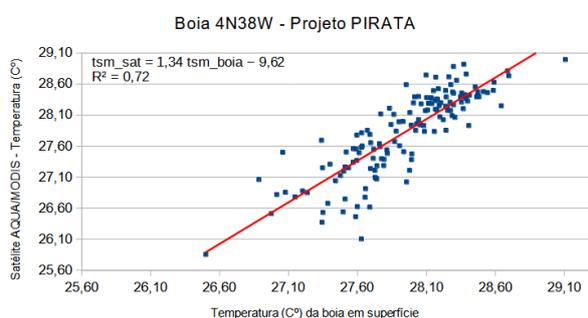


Gráfico 38. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (4° N – 38° W), e a reta de regressão linear.

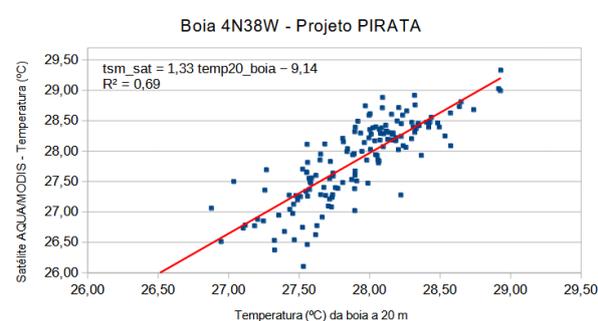


Gráfico 39. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (8° N – 38° W), e a reta de regressão linear.

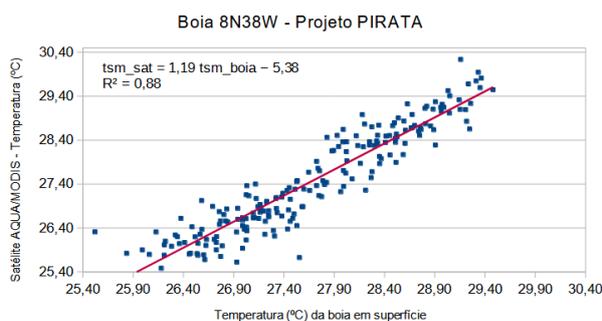
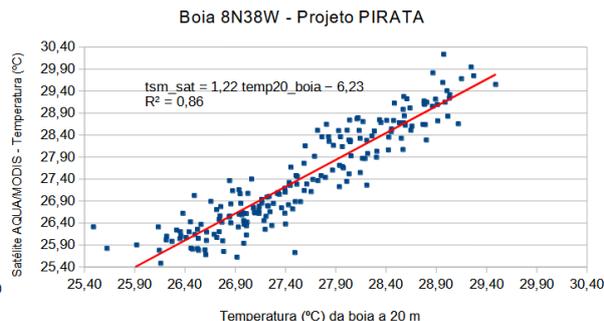


Gráfico 40. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (8° N – 38° W), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

O coeficiente de Pearson calculado para 4° N – 38° W demonstrou uma relação nas variações entre TSM de satélites e temperatura da bóia em superfície de 0,72, porém os de correlação (R) apresentaram valores muito superiores, 0,91 para a superfície 0,87 para 20 m. Diante disso, os valores de R obtidos indicam uma boa correlação, ao se considerar os resultados anteriores e a correlação forte como as mais próximas de 1. Entretanto, os resultados

de R^2 não devem ser rejeitados. Além disso, os valores obtidos por meio das métricas de erro, $-0,16\text{ °C}$ (ME), $0,29\text{ °C}$ (MAE) e $0,40\text{ °C}$ (RMSE), indicam taxa de erro reduzida.

Por outro lado, em $8^\circ\text{ N} - 38^\circ\text{ W}$ houve um grau de relação (R^2) entre as duas variáveis de $0,88$ para temperatura da bóia em superfície e de $0,86$ para temperatura da bóia a 20m , além de r no valor $r = 0,94$ e $r = 0,93$ para superfície e a 20m . Demonstrando, entre as bóias analisadas, não a melhor correlação, mas um valor aceitável. Ademais, semelhante aos resultados de índices de erros na bóia $4^\circ\text{ N} - 38^\circ\text{ W}$, esses se encontram baixos, $\text{ME} = -0,21\text{ °C}$, $\text{MAE} = 0,39\text{ °C}$ e $\text{RMSE} = 0,49\text{ °C}$.

Gráfico 41. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA ($12^\circ\text{ N} - 23^\circ\text{ W}$), e a reta de regressão linear.

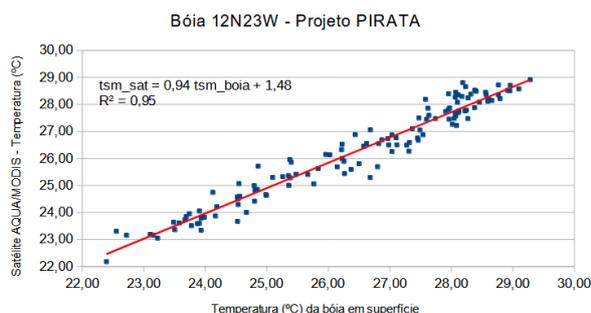


Gráfico 42. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA ($12^\circ\text{ N} - 23^\circ\text{ W}$), e a reta de regressão linear

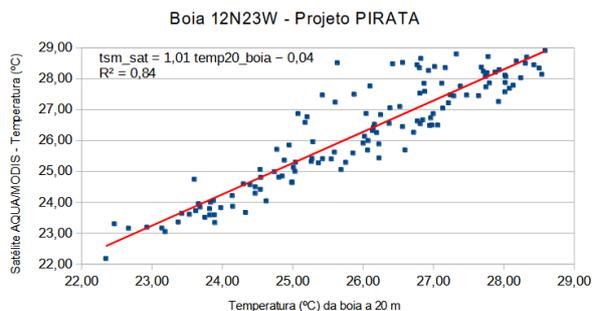


Gráfico 43. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA ($12^\circ\text{ N} - 38^\circ\text{ W}$), e a reta de regressão linear.

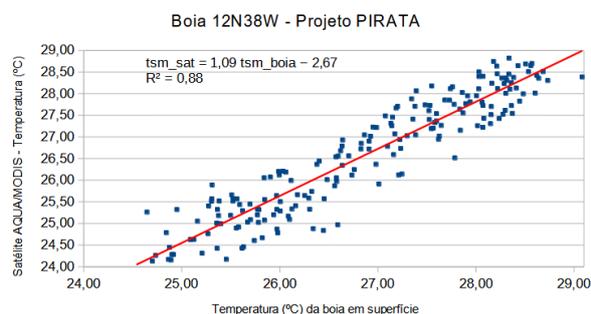
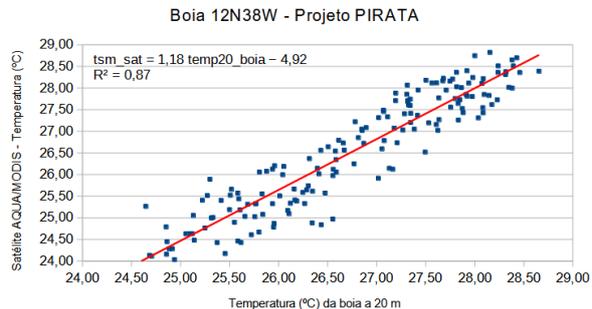


Gráfico 44. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA ($12^\circ\text{ N} - 38^\circ\text{ W}$), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar nos gráficos acima que, embora os dados não tenham seguido uma relação linear perfeita, os coeficientes de correlação obtiveram valores próximo de 1, principalmente em $12^\circ\text{ N} - 23^\circ\text{ W}$, demonstrando uma relação forte das temperaturas medidas

pelas bóias e das TSMs de satélite. Entretanto para a mesma localidade a 40m houve uma queda abrupta de correlação r para $r = -0,34$, visto que, para os dados de superfície e a 20 m os valores correspondidos foram $r = 0,97$ e $r = 0,92$. Cenário semelhante pôde ser visualizado em $12^\circ \text{ N} - 23^\circ \text{ W}$, enquanto em superfície e a 20 m a correlação obtida foi de $r = 0,94$, a 40 m o valor passou para $r = 0,10$. O valor da raiz quadrática do erro médio de $\text{RMSE} = 0,24$ para a bóia $12^\circ \text{ N} - 38^\circ \text{ W}$ obtido foi bem reduzido quando comparado a todas as bóias analisadas.

Gráfico 45. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA ($15^\circ \text{ N} - 38^\circ \text{ W}$), e a reta de regressão linear.

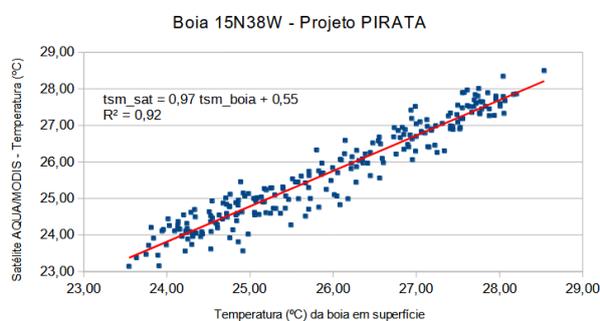


Gráfico 46. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA ($15^\circ \text{ N} - 38^\circ \text{ W}$), e a reta de regressão linear.

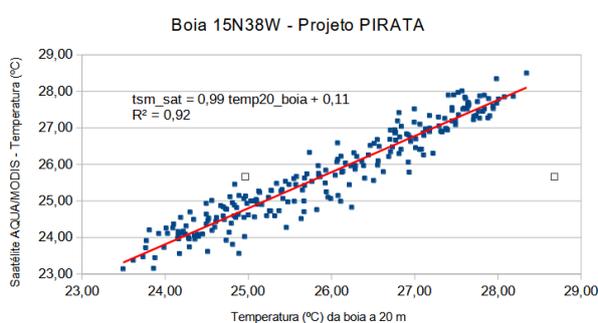


Gráfico 47. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA ($21^\circ \text{ N} - 23^\circ \text{ W}$), e a reta de regressão linear.

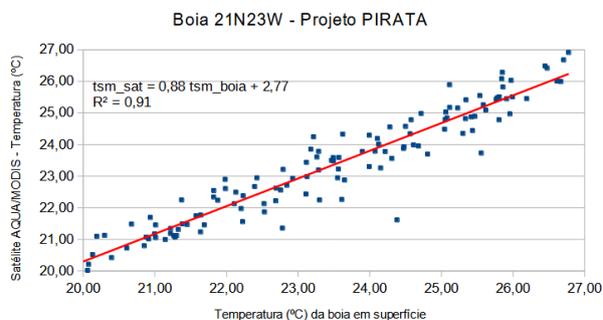


Gráfico 48. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS versus Bóia PIRATA ($21^\circ \text{ N} - 23^\circ \text{ W}$), e a reta de regressão linear.

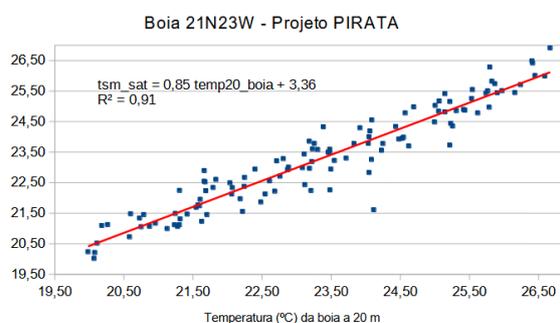


Gráfico 49. Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (20° N – 38° W), e a reta de regressão linear.

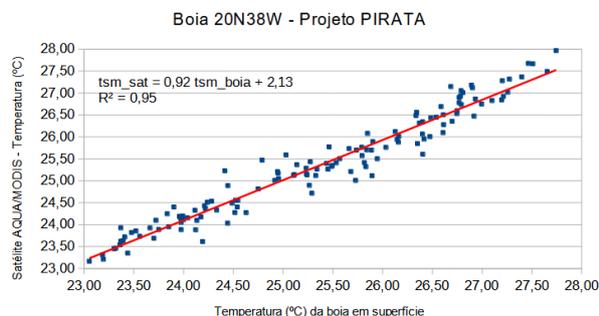
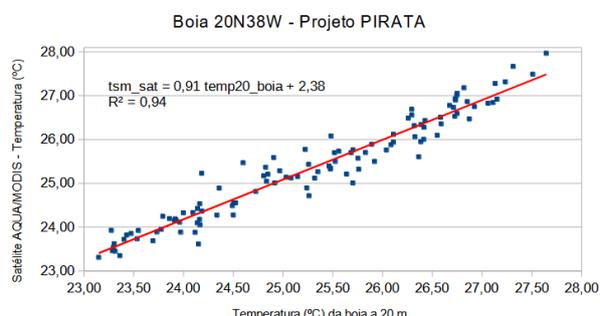


Gráfico 50 Diagrama de dispersão dos dados AQUA/MODIS *versus* Bóia PIRATA (20° N – 38° W), e a reta de regressão linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nas localizações 15° N – 38° W e 21° N – 23° W, o grau de relação entre os valores de temperatura obtidos pelas bóias e de TSM do satélite seguem uma relação linear forte e que se sustenta apesar do aumento da profundidade, indicando uma camada de mistura homogênea. No mesmo segmento incorre a bóia a 20° N – 38° W, demonstrando uma pequena queda de correlação de 2 décimos.

Para 15° N – 38° W, os valores de correlação (r) se apresentaram como bons ($>0,70$) até os 40 metros de profundidade, demonstrando em 60 metros uma correlação de $r = 0,28$. Da mesma maneira seguiram os valores para 20° N – 38° W, e apresentaram boa correlação (r) até os 60 metros, obtendo $r = 0,79$. Entretanto, em 21° N – 23° W os valores considerados bons de correlação foram até somente 20 metros de profundidade, alcançando $r = 0,95$.

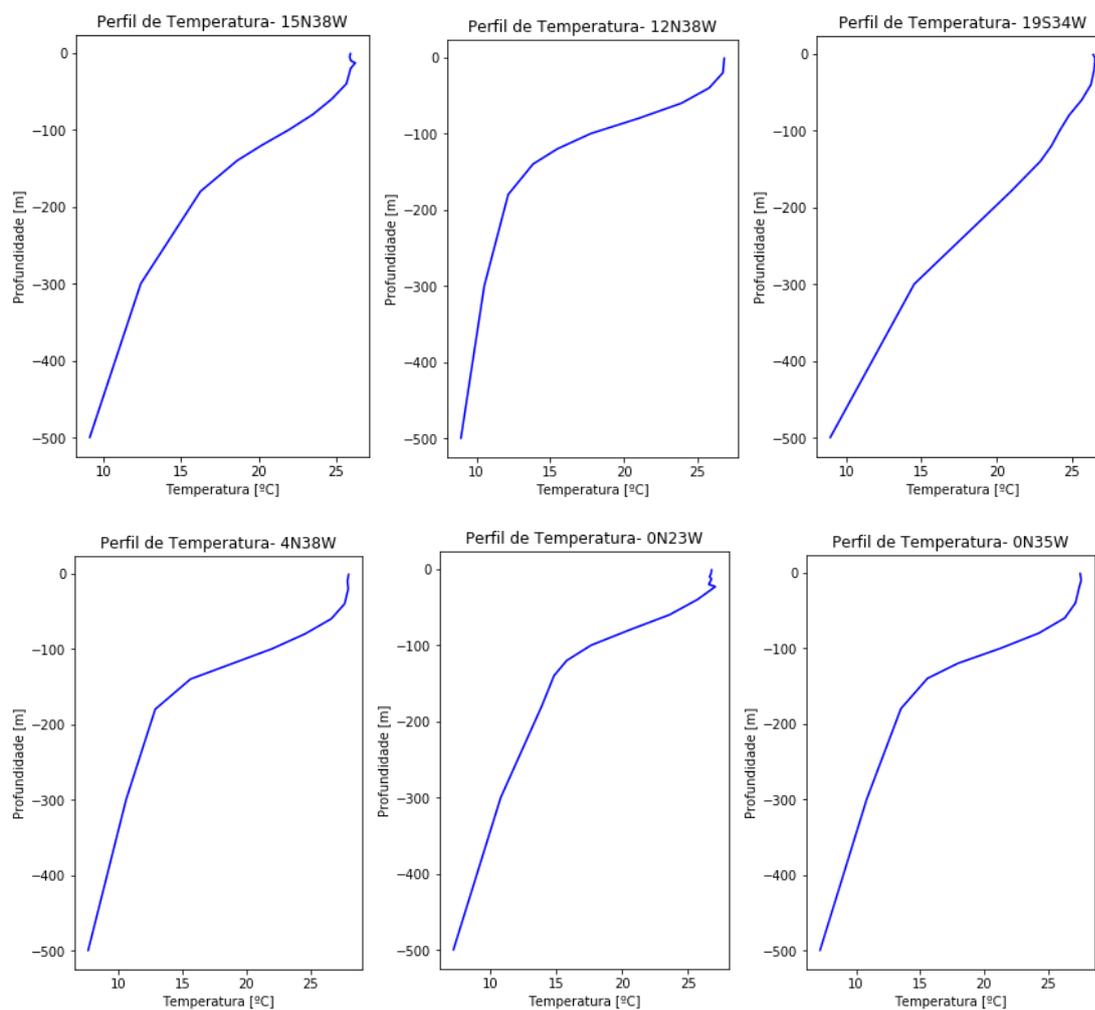
Entre as três últimas bóias analisadas (15° N – 38° W, 20° N - 38°W e 21° N – 23° W) os valores de erro foram reduzidos, entretanto a bóia 20° N – 38° W obteve os menores valores entre as três, se destacando também entre todas as outras, principalmente para o ME, -0,02.

Diante disso, pode-se concluir que as bóias do Atlântico a sudoeste do Equador obtiveram as melhores correlações, enquanto que as bóias a noroeste foram estimadas como as piores. No entanto, causando uma divergência dos resultados obtidos por Arruda e Lentini (2011), que utilizaram o sensor TRMM Microwave Imager e dados climatológicos do World Ocean Atlas 2001, de 1998 a 2006, para a comparação com os dados de 5 bóias do Projeto PIRATA.

5.3 Termoclina

As figuras a seguir representam os perfis verticais de temperatura considerando dados desde a superfície até 500 m de profundidade. Estes perfis de temperatura foram plotados com a finalidade de identificar a profundidade da termoclina na latitude/longitude onde as boias PIRATA estão fundeadas.

Figura 4. Perfis verticais de temperatura para as bóias: 15° N – 38° W; 12° N – 38° W; 19° S – 34° W; 4° N – 38° W; 0° N – 23° W; 0° N – 35° W; 5° S – 10° W; 6° S – 10° W.



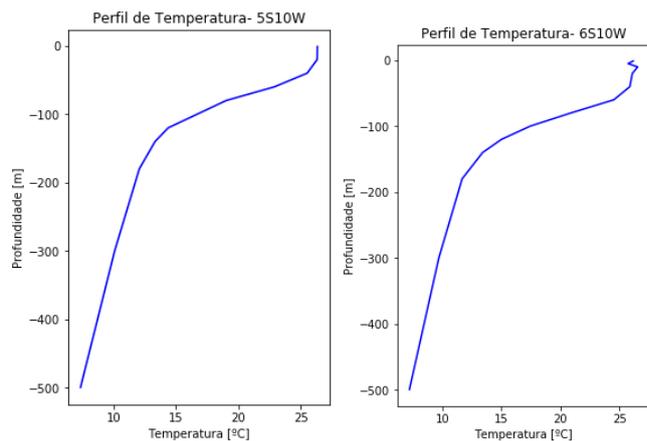
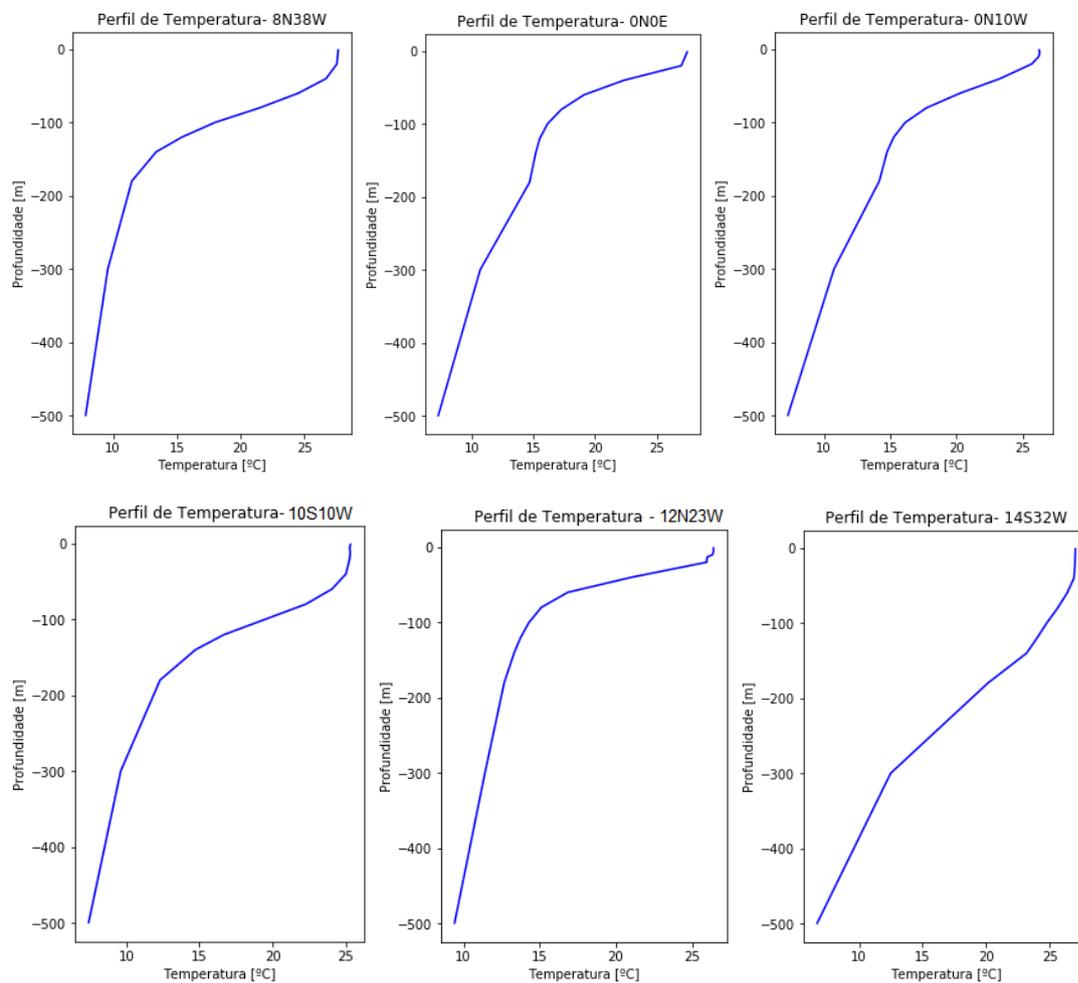
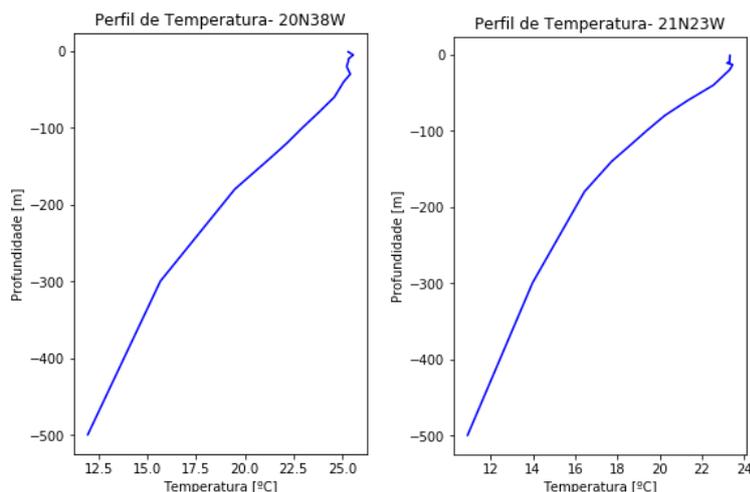


Figura 5. Perfis verticais de temperatura para as bóias: 8° N – 38° W; 0° N – 0° E; 0° N – 10° W; 10° S – 10° W; 12° N – 23° W; 14° S – 32° W; 20° N – 38° W; 21° N – 23° W.





Fonte: Elaborado pela autora.

Em pequenas e médias latitudes a temperatura diminui com a profundidade. Primeiramente, observa-se a camada de mistura, uma região isotérmica. Logo abaixo, a termoclina se faz presente, região que ocorre queda abrupta de temperatura, na qual varia dependendo da latitude em que se encontra. A termoclina varia verticalmente no Atlântico Equatorial a partir de diferentes influências.

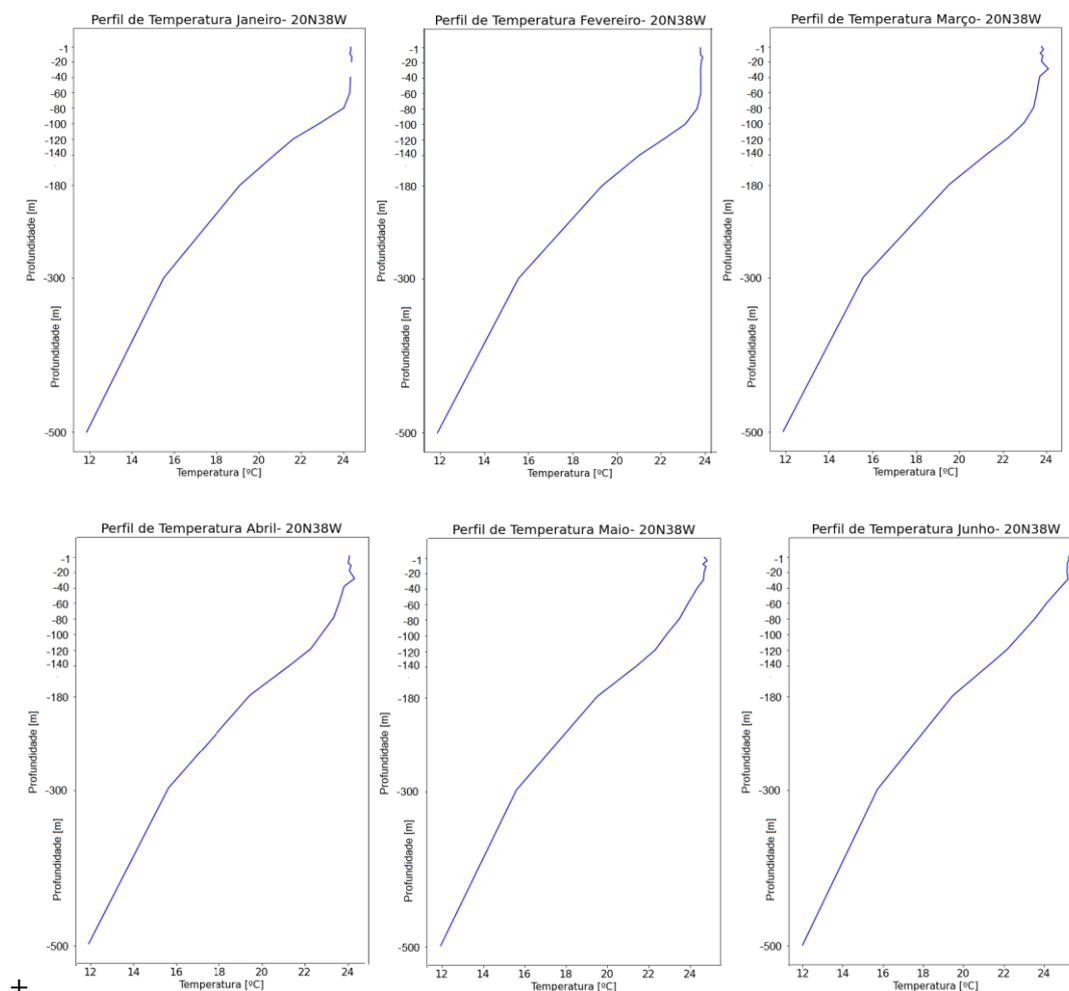
Na parte leste, sua variação corresponde ao ciclo anual da componente zonal do vento em superfície, e sua configuração é resultado do aquecimento ocorrido devido a formação geométrica do continente africano (PHILANDER, 1997). Já o lado oeste tem o ciclo de TSM influenciado pela interação oceano atmosfera, logo, pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal forçante de mudanças térmicas na superfície do Atlântico. Os ventos alísios menos intensos levam a TSMs mais quentes e intensos volumes de precipitação, além de baixa variação sazonal. Enquanto que ventos alísios mais fortes ocasionam TSMs mais frias (NOBRE e SHUKLA, 1996).

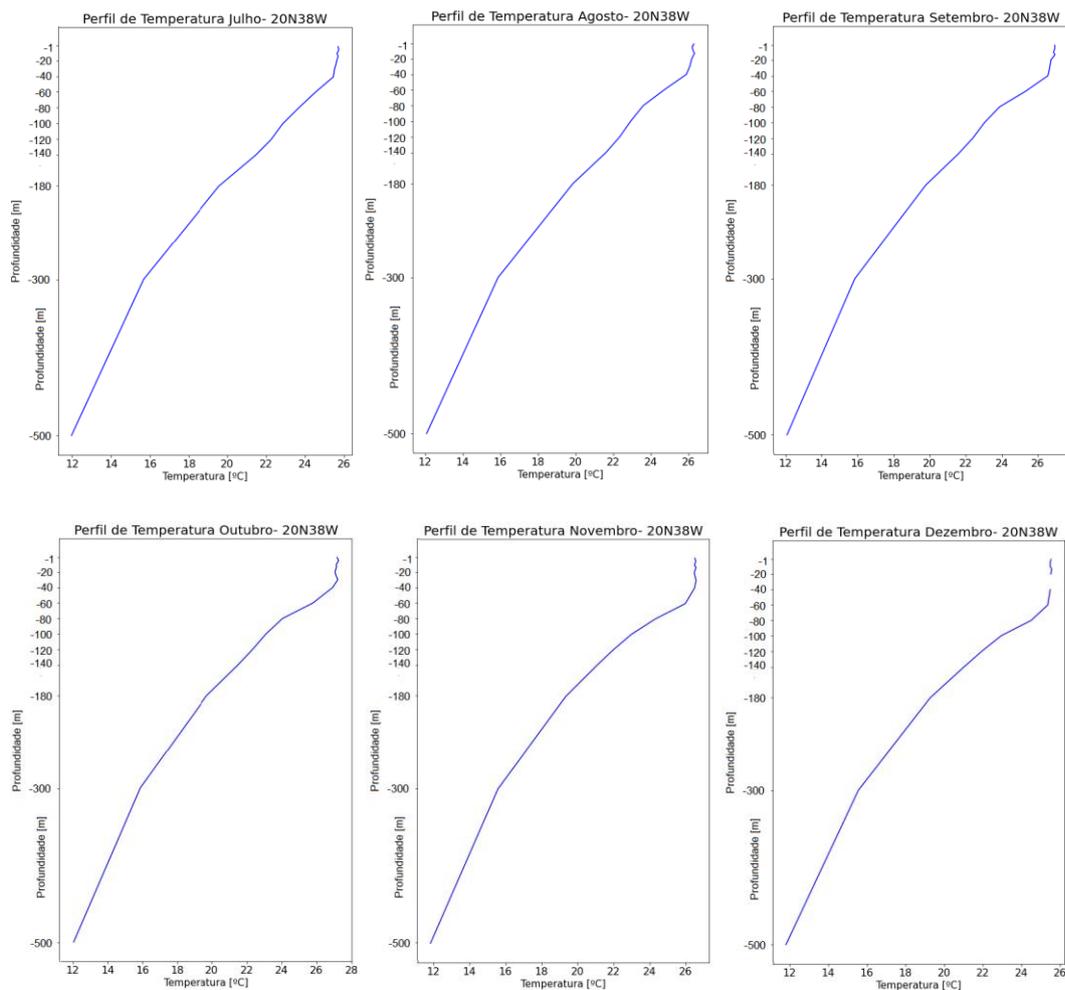
Nas Figuras 4 e 5, indicando as bóias mais a oeste do Atlântico Equatorial, encontram-se as termoclinas mais profundas, como pode ser visto nos gráficos a 38° W. Isto pode ser explicado a partir da configuração da circulação atmosférica e sua interação com a superfície oceânica. Os ventos alísios dirigidos a oeste e mais intensos causam um empilhamento de água e aumento do nível do mar (GOES, 2002). Ademais, pelo mesmo motivo as termoclinas mais rasas se encontram na região leste do Atlântico, como pode ser observado na Figura 5 da bóia 0° N – 0° E. Ainda, de acordo com Jouanno (2011), grandes cisalhamentos na superfície do oceano podem ser ocasionados devido a ventos alísios de sudeste, que acarreta uma mistura vertical das águas subsuperficiais com a camada superficial.

5.3.1 Variação Sazonal

A temperatura da superfície e subsuperfície do oceano está altamente associada a eventos atmosféricos, desse modo, a ZCIT se encontra como a grande influenciadora na dinâmica oceano-atmosfera no oeste do Atlântico Equatorial. Ademais, variações de profundidade da termoclina ocorrem devido a fortes gradientes horizontais de densidade, associados à interação do oceano com o cisalhamento do vento em superfície e ao nível do mar. A ZCIT possui um deslocamento vertical ao longo do ano, que transforma a dinâmica dos eventos físicos nas regiões em que está situada. Ademais, está relacionada com a latitude de maior deslocamento vertical da termoclina (HOUGHTON, 1991).

Figura 6. Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 20° N – 38° W





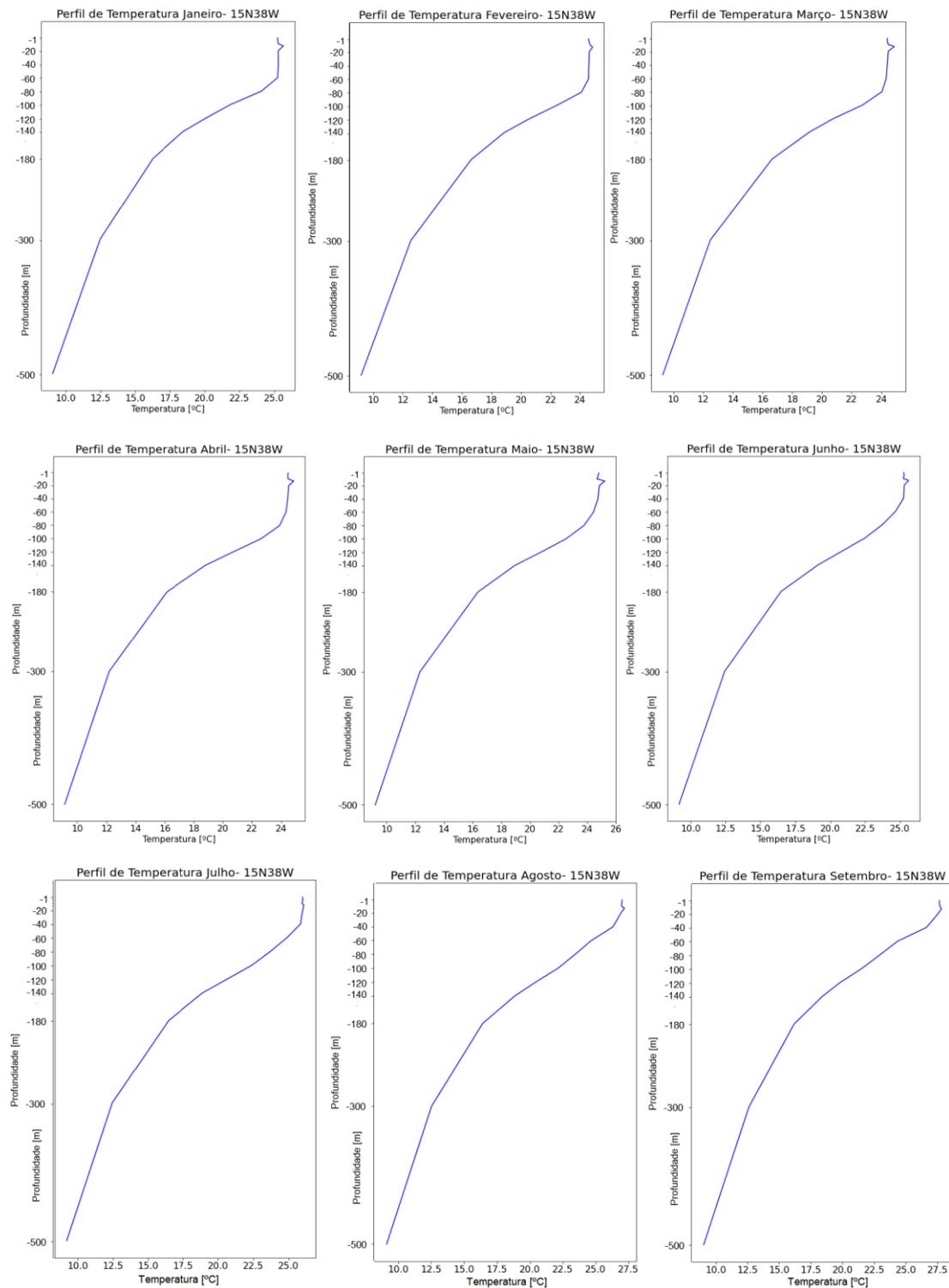
Fonte: Elaborado pela autora.

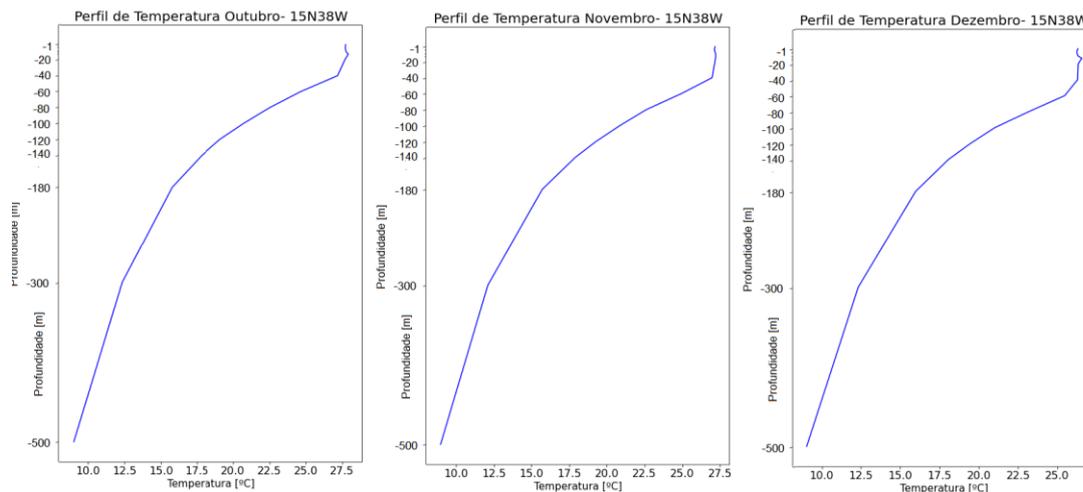
Segundo estudos realizados por Hastenrath e Lamb (1997), durante o verão no Hemisfério Norte (HN), nos meses de junho, julho e agosto, a Zona de Confluência dos Alísios (ZCA) se situa sobre o Cavado Equatorial, área no Atlântico de máxima TSM, convergência de massa, cobertura de nuvens e precipitação, a 17°N; e a ZCIT, caracterizada por ventos fracos, abaixo, a 14°N. Enquanto que durante o verão no Hemisfério Sul (HS), nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, a Zona de Confluência dos Alísios (ZCA) se situa no HS e a ZCIT logo abaixo. Para Nobre e Molion (1998) a latitude da ZCIT durante o verão do HN também se encontra a 14°N, durante os meses de agosto a setembro. No mesmo contexto, durante os meses de março a abril a ZCIT se encontra a cerca de 2°S.

Para os meses de dezembro a fevereiro, para a localidade de 20°N 38°W (figura 6), foi observado um aumento na profundidade da camada de mistura, passando dos 60 metros em dezembro. Enquanto que para os meses de junho, julho e agosto, houve diminuição da camada

de mistura, além do aumento de temperatura, que pode ser explicado pela proximidade com a ZCIT.

Figura 7. Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 15° N – 38° W

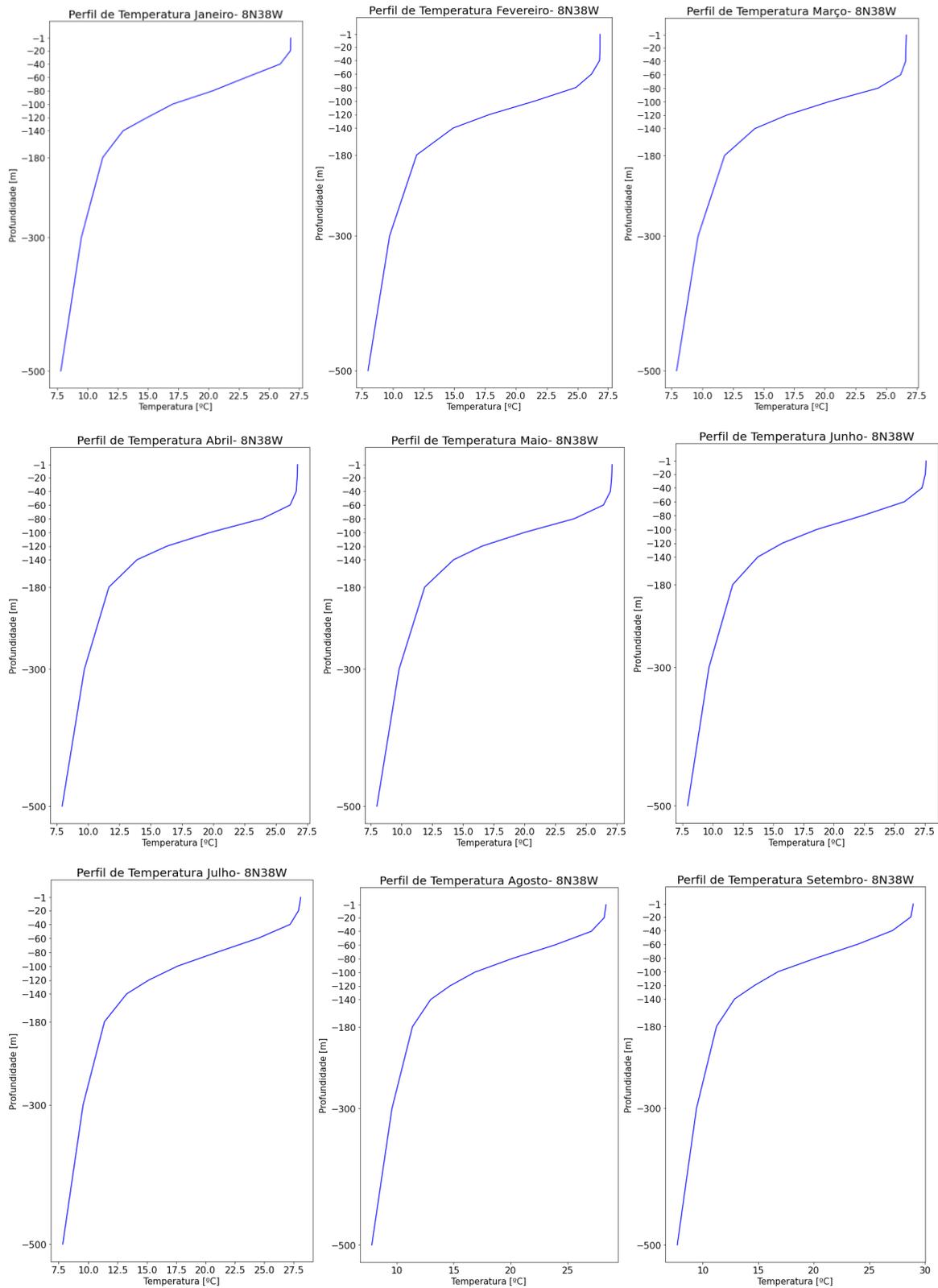


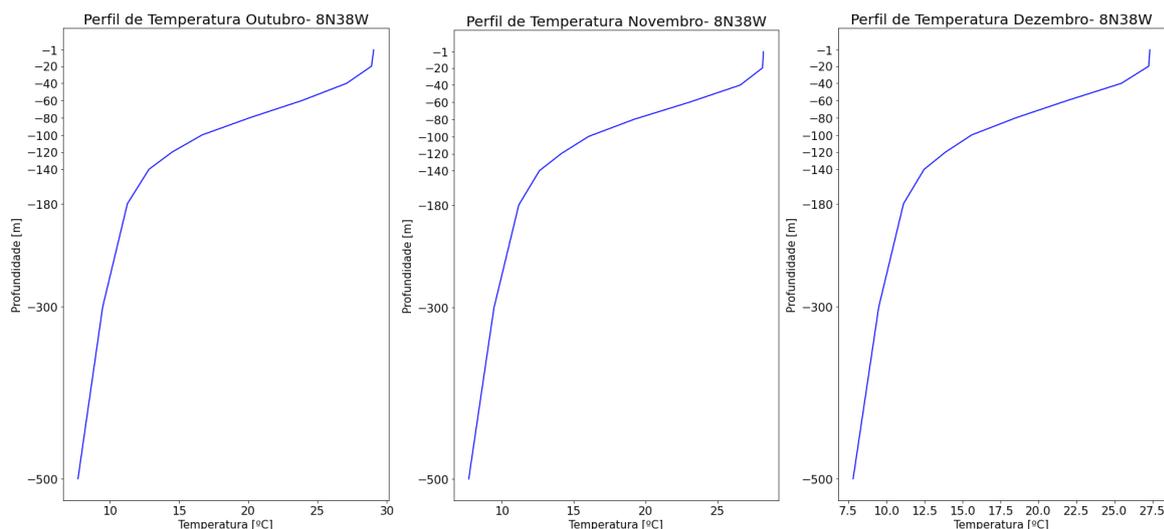


Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando os meses de verão no HN, junho a setembro, tem-se nesses períodos assim como observado anteriormente a diminuição da camada de mistura e o aumento da temperatura, principalmente no mês de agosto. É possível identificar mudanças nos perfis de temperatura da localidade de 15° N – 38° W (Figura 7), durante os meses de agosto a novembro a camada de mistura se encontra com menor amplitude quando comparada aos outros meses do ano. Assim como, é observado o aumento de temperatura. Nos meses de janeiro a abril, a termoclina se inicia em uma profundidade maior (60 a 80 m) quando considerado os demais meses, semelhante ao que pode ser observado na Figura 7. Ainda, segundo Nobre (1998), nos meses de agosto e setembro a ZCIT se localiza mais ao norte, alcançando a latitude 14° N.

Figura 8. Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 8° N – 38° W.





Fonte: Elaborado pela autora.

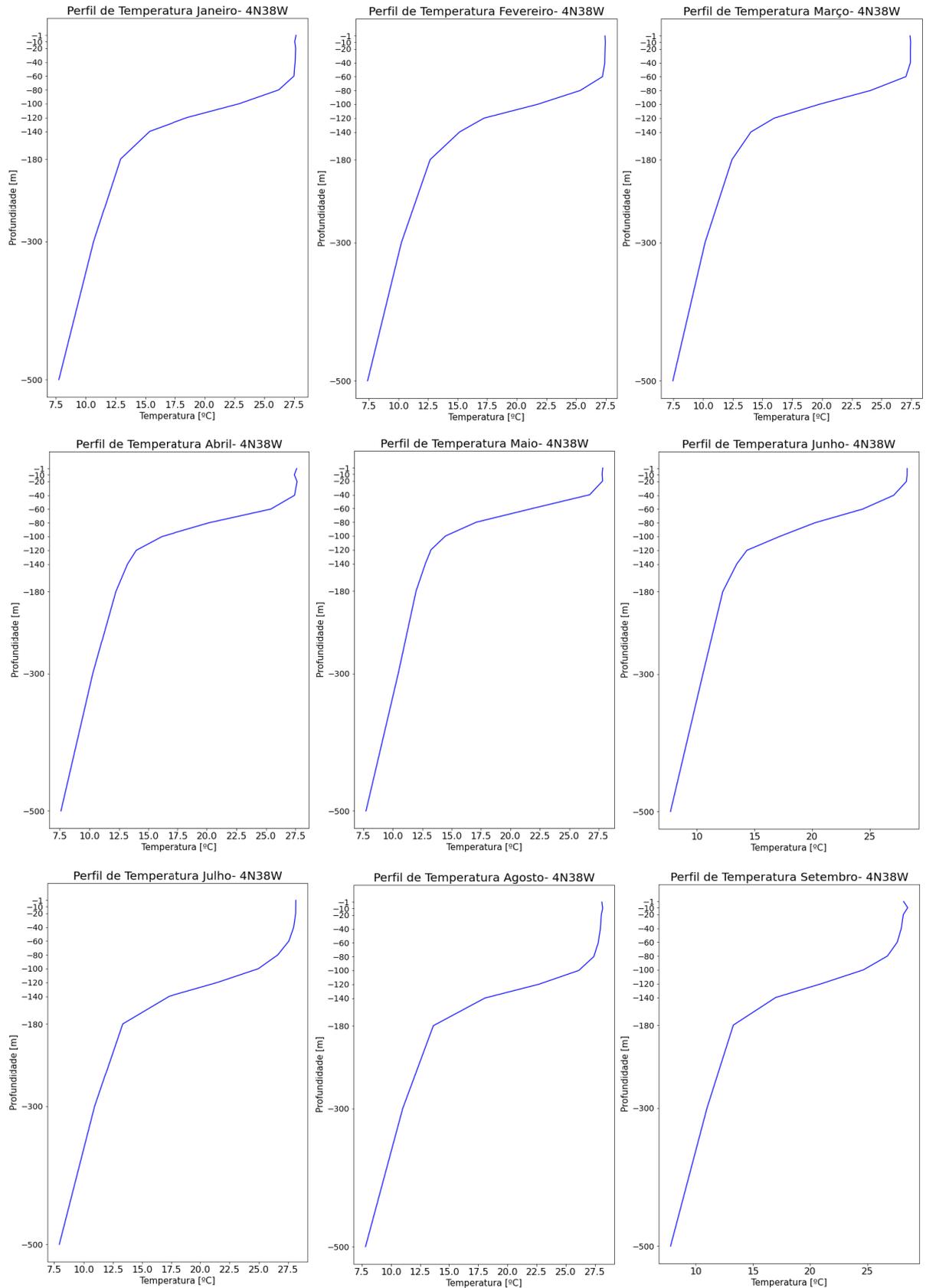
Ainda, de acordo com estudos realizados por Nobre e Molion (1998), nos meses de março a abril a ZCIT se encontraria na localização mais ao sul, 2°S. E, de acordo com Hastenrath e Lamb (1997), ela chegaria ao limite de sua movimentação vertical para o HS entre dezembro a fevereiro, onde estaria mais ao sul da ZCA que se encontraria no HS.

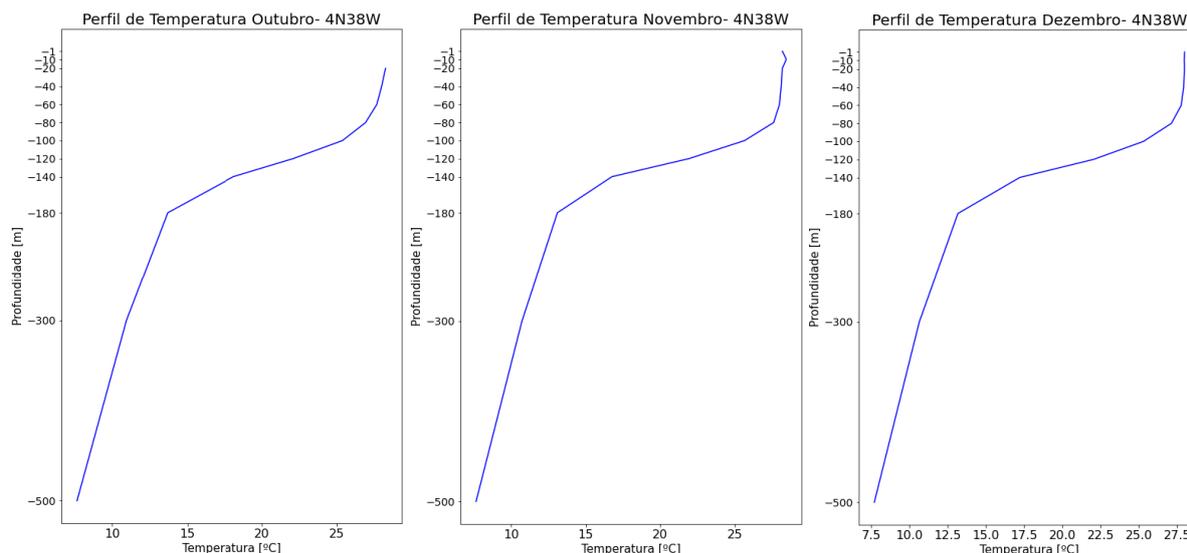
É possível observar uma tendência de aumento da amplitude da camada de mistura nos meses de fevereiro a junho (Figura 8). Ademais, entre os meses de setembro a novembro pode ser observado aumento da temperatura, assim como a diminuição da camada de mistura, sendo, portanto, indicativo da presença da ZCIT e seu deslocamento sazonal.

Para a região 4°N 38° W (Figura 9), os meses de maiores amplitudes da camada de mistura da superfície e subsuperfície foram de agosto a novembro. Nos meses de abril e maio foram observadas as menores amplitudes da camada de mistura, ao considerar a localização da ZCIT, dois graus ao norte entre março e abril, pode-se justificar que a camada superficial e subsuperficial do oceano tenha sido influenciada pela diminuição do cisalhamento do vento.

Por fim, cabe ressaltar que devido a suas características, o deslocamento da ZCIT em direção ao sul é importante para o ciclo anual e a duração do período de chuvas das regiões Norte e Nordeste do Brasil (NOBRE e UVO, 1989).

Figura 9. Perfis verticais de temperatura (média mensal) para a 4° N – 38° W.





Fonte: Elaborado pela autora.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram investigadas as correlações entre as TSMs estimadas pelo satélite AQUA, sensor MODIS, e as temperaturas, medidas *in situ*, do oceano Atlântico. Foram utilizados 20 anos de dados MODIS com médias mensais da temperatura da superfície do oceano, tendo início em setembro de 1998 e fim em outubro de 2018. Os dados *in situ*, foram oriundos de 17 bóias ATLAS do Projeto PIRATA medidos desde a superfície e subsuperfície do oceano (1 m a 500 m). Houve a remoção de *not a numbers* para o cálculo das correlações e realizar as regressões lineares. Os baixos índices de erro (ME, MAE e RMSE) e as altas correlações de Pearson (r) e altos coeficientes de correlação (R^2) indicaram a boa concordância entre as TSMs estimadas pelo satélite e a temperatura superficial (a 1m), medidas pelas boias PIRATA.

As correlações realizadas entre as temperaturas das bóias nas primeiras camadas do oceano e as TSMs do AQUA/MODIS, apresentaram, em geral, r superior a 0,7, exceto para a bóia a 4°N 38° W a 20 m de profundidade cujo coeficiente de determinação foi de 0,69, não alcançando o limite estabelecido para uma boa correlação nessa profundidade. Não obstante, das 17 correlações calculadas, 15 atingiram valores de coeficiente de Pearson maiores que 0,80, alcançando fortes correlações.

Diante disso, após os resultados obtidos, pode-se concluir que as bóias do Atlântico a sudoeste do Equador obtiveram as melhores correlações, enquanto que para as bóias a noroeste

foram estimadas as piores. Divergindo de resultados anteriores (ARRUDA e LENTINI, 2011), podendo, portanto, ser um indicativo de melhoria dos dados das bóias presentes no Atlântico a sudoeste do Equador.

Para as bóias localizadas na radial 38° W, verificou-se a influência da ZCIT, na determinação da profundidade da termoclina.

Por fim, os resultados obtidos mostraram que o sensor MODIS produz dados de temperatura superficial com boa acuracidade, alcançando boa correlação até 20 m de profundidade, exceto para a bóia a 4° N 38° W.

7 REFERÊNCIAS

- ROBINSON, I. S. Discovering the ocean from space: the unique applications of satellite oceanography. 2010.
- PHILANDER, S. G. H.. Atlantic Ocean Equatorial Currents. In: STEELE, J. H.; TUREKIAN, K. K.; STEVE, A. (Ed.). Encyclopedia of Ocean Sciences, Elsevier, p.188-191, 2001.
- NOBRE, C. A.; CITEAU, J.; UVO, C. R. B.. A note on ITCZ migration in the Atlantic Ocean. In: NOBRE, P. A.. Variabilidade interanual do Atlântico Tropical e sua influência no clima da América do Sul. Climanálise. 10 anos – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, CPTEC/INPE, 1996.
- NOBRE, P. Uma Revisão Sobre o Dipolo no Atlântico Tropical. Revista Brasileira de Meteorologia, v.13, n. 1, p. 31-44, 1998.
- DE ALMEIDA, R.A.F.; NOBRE, P.. Equatorial Undercurrent and North Equatorial Countercurrent at 380W: a new perspective from direct velocity data. Journal of Geophysical Research, v. 113, n. C04041, 2008.
- SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America, Journal Of Climate, [s. L], v. 9, p.2464-2479, 1996.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J.. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. Journal Of Atmospheric Sciences, [s. L], v. 38, p.2653-2675, 1981.
- HUANG, B.; SHUKLA, J.. Characteristics of the interannual and decadal variability in a general circulation model of the tropical Atlantic Ocean. 30. ed. Maryland: Center For Ocean-land-atmosphere Studies (cola), 1996. 57 p.
- LIANA PACHECO BITTENCOURT Resposta da Circulação no Oceano Atlântico Tropical Oeste ao Modo Meridional do Atlântico. 2016. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Universidade Federal do Ceará, 2016.
- GOES, M. P.. Circulação no Atlântico Tropical para Eventos Extremos. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- JOUANNO, J. et al. Seasonal modes of surface cooling in the Gulf of Guinea. Journal of Physical Oceanography, [s. L], v. 14, p.1408-1416, 2011.

- HOUGHTON, R. W.. The relationship of sea surface temperature to thermocline depth at annual and interannual time scales in the tropical Atlantic Ocean. *Journal Of Geophysical Research*, [s. L], v. 96, p.15173-15185, 1991.
- MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S.. Case studies of climatic events in Amazon basin. *Journal Of Climate*, [s. L], v. 6, n. 4, p.617-627, abr. 1993.
- HASTENRATH, S.. Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. *Progress In Oceanography*, [s. L], v. 70, n. 2-4, p.407-415, 2006.
- RAFAEL DUARTE VIANA- Estudo Comparativo Entre Dados de Vento Sobre o Oceano Atlântico Tropical Estimados Pelo Satélite METOP-ASCAT e Medidos Pelas Bóias do Projeto Pirata. - TCC (graduação), Universidade Federal do Ceará, 2018.
- LAMB, P.. Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific oceans. Wisconsin: University Of Wisconsin Press, 117 p., 1977.
- MOLION, L. C. B.. Amazonian rainfall and its variability. In: *Hydrology and Water Management in the Humid Tropics*, Ed., p.p. 99-111, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- ARRUDA e LENTINI. A Remote Sensing Derived Upper Ocean Heat Content Dataset For The Equatorial Atlantic: Comparison With PIRATA Project Data. 2011.
- ARAÚJO. Estudo acerca do coeficiente de determinação nos modelos lineares e algumas generalizações. 2009.
- QUININO e BESSEGATO. O Coeficiente de Determinação R² como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla. 2011.
- SOUZA, Ronald Buzz. Sensoriamento Remoto dos Oceanos. *Espaço e Geografia*, 2003.

8 APÊNDICES

8.1 APÊNDICE A - TABELAS COM DADOS ESTATÍSTICOS

Tabela 3- Dados estatísticos de cada bóia

BOIA 0° N 0° E	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	24,05	29,96	27,41	1,53	0,96	188
Satélite		23,73	29,88	26,93	1,48		
Boia	20 m	21,35	29,52	26,96	1,70	0,90	180
Satélite		23,73	29,88	26,93	1,48		
Boia	40 m	16,72	26,56	22,28	2,71	0,62	190
Satélite		23,73	29,88	26,89	1,48		
Boia	60 m	15,38	24,44	19,05	1,90	0,59	190
Satélite		23,73	29,88	26,85	1,47		

BOIA 0° N 10° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	22,08	29,44	26,18	1,99	0,98	196
Satélite		22,42	29,40	25,80	1,74		
Boia	5 m	23,03	29,41	26,03	1,91	0,97	24
Satélite		23,13	28,58	25,72	1,62		
Boia	10 m	22,71	29,36	25,94	1,96	0,97	24
Satélite		23,13	28,58	25,72	1,62		
Boia	20 m	20,42	28,71	25,63	2,10	0,96	194
Satélite		22,42	29,40	25,78	1,75		
Boia	40 m	17,79	26,37	23,27	2,12	0,79	197
Satélite		22,42	29,40	25,75	1,73		
Boia	60 m	15,92	24,61	20,27	1,91	0,59	189
Satélite		22,42	29,40	25,75	1,72		

BOIA 0° N 23° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	24,01	29,11	26,75	1,18	0,96	221
Satélite		23,96	29,37	26,611	1,20		
Boia	5 m	24,03	28,93	26,67	1,09	0,97	96
Satélite		24,17	29,37	26,64	1,18		
Boia	10 m	23,90	28,71	26,56	1,10	0,97	148
Satélite		23,96	29,33	26,53	1,17		
Boia	13 m	24,89	28,84	26,77	1,00	0,96	47
Satélite		24,97	29,37	26,76	1,18		
Boia	20 m	23,73	28,54	26,53	1,05	0,93	195
Satélite		23,96	29,37	26,65	1,19		
Boia	23 m	26,20	28,27	27,06	0,72	0,96	9
Satélite		26,16	29,37	27,48	1,23		
Boia	40 m	22,33	27,69	25,70	0,96	0,76	222
Satélite		23,96	29,37	26,63	1,19		
Boia	60 m	19,47	26,19	23,62	1,39	0,20	200
Satélite		23,96	29,37	26,60	1,19		

BOIA 0° N 35° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	26,30	28,94	27,52	0,56	0,92	198
Satélite		26,18	29,28	27,50	0,59		
Boia	10 m	27,05	27,53	27,28	0,24	0,80	3
Satélite		27,24	27,80	27,47	0,29		
Boia	20 m	26,24	28,74	27,43	0,52	0,90	170
Satélite		26,18	29,28	27,50	0,57		
Boia	40 m	26,05	28,24	27,15	0,39	0,74	179
Satélite		26,32	28,92	27,48	0,55		
Boia	60 m	22,78	27,44	26,31	0,85	-0,30	199
Satélite		26,32	28,92	27,50	0,56		

BOIA 4° N 23° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	26,35	29,99	28,09	0,62	0,87	132
Satélite		25,76	30,19	27,93	0,81		
Boia	10 m	26,32	29,97	28,07	0,61	0,87	138
Satélite		25,76	30,19	27,93	0,80		
Boia	13 m	26,33	30,01	28,05	0,63	0,89	115
Satélite		25,76	29,63	27,87	0,78		
Boia	20 m	26,27	29,91	28,01	0,63	0,87	135
Satélite		25,76	30,19	27,91	0,81		
Boia	40 m	19,53	29,49	27,28	1,54	0,44	138
Satélite		25,76	30,19	27,92	0,79		
Boia	60 m	16,54	28,26	24,63	3,16	0,02	131
Satélite		25,76	30,19	27,90	0,79		

BOIA 4° N 38° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	26,50	29,11	27,95	0,42	0,85	146
Satélite		25,85	28,99	27,83	0,66		
Boia	10 m	27,27	28,04	27,57	0,33	0,71	4
Satélite		26,97	27,94	27,49	0,42		
Boia	20 m	26,29	28,93	27,91	0,42	0,83	152
Satélite		25,85	29,33	27,85	0,67		
Boia	40 m	24,71	28,82	27,62	0,66	0,44	137
Satélite		26,10	29,33	27,83	0,65		
Boia	60 m	18,13	28,51	26,61	2,15	0,19	187
Satélite		25,85	29,33	27,84	0,66		

BOIA 6° S 10° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	23,62	28,90	26,13	1,59	0,99	203
Satélite		23,30	28,65	25,88	1,51		
Boia	5 m	24,35	28,01	25,74	1,27	0,99	11
Satélite		23,90	27,75	25,41	1,27		
Boia	20 m	23,57	28,92	26,03	1,56	0,99	206
Satélite		23,30	28,65	25,83	1,49		
Boia	40 m	23,50	28,88	25,82	1,46	0,96	2015
Satélite		23,30	28,65	25,82	1,49		
Boia	60 m	19,88	27,74	24,45	1,44	0,50	191
Satélite		23,30	28,65	25,84	1,52		

BOIA 8° N 38° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	25,52	29,48	27,67	0,91	0,94	203
Satélite		25,366	30,23	27,46	1,16		
Boia	20 m	25,49	29,49	27,57	0,87	0,93	195
Satélite		25,36	30,23	27,43	1,15		
Boia	40 m	21,38	28,65	26,74	1,05	0,38	186
Satélite		25,36	30,23	27,46	1,15		
Boia	60 m	16,68	27,58	24,56	2,12	-0,16	221
Satélite		25,36	30,23	27,45	1,16		

BOIA 8° S 30° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	25,85	29,22	27,57	0,88	0,98	124
Satélite		25,61	29,06	27,32	0,92		
Boia	20 m	26,13	29,18	27,50	0,88	0,98	103
Satélite		25,60	29,06	27,26	0,93		
Boia	40 m	25,82	29,16	27,47	0,87	0,98	127
Satélite		25,60	29,06	27,25	0,92		
Boia	60 m	25,81	29,10	27,41	0,81	0,96	134
Satélite		25,61	29,06	27,30	0,90		
Boia	80 m	25,08	27,99	26,66	0,61	0,42	138
Satélite		25,60	29,06	27,27	0,91		

BOIA 10° S 10° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	22,85	27,93	25,27	1,45	0,99	236
Satélite		22,64	27,90	25,16	1,40		
Boia	10 m	23,00	27,87	25,19	1,47	0,99	141
Satélite		22,64	27,90	25,08	1,43		
Boia	13 m	22,99	27,88	25,31	1,52	0,99	77
Satélite		22,67	27,90	25,19	1,48		
Boia	20 m	22,82	27,86	25,22	1,44	0,99	239
Satélite		22,64	27,90	25,15	1,39		
Boia	40 m	22,64	27,70	25,00	1,34	0,95	232
Satélite		22,67	27,90	25,14	1,38		
Boia	60 m	22,10	27,07	24,04	1,08	0,53	226
Satélite		22,64	27,90	25,09	1,38		

BOIA 12° N 23° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	22,39	29,28	26,43	1,82	0,97	126
Satélite		22,18	28,91	26,24	1,75		
Boia	5 m	22,39	29,21	26,39	1,79	0,97	118
Satélite		22,18	28,91	26,25	1,75		
Boia	10 m	22,37	29,18	26,33	1,73	0,97	142
Satélite		22,18	28,91	26,20	1,70		
Boia	13 m	22,37	28,50	25,99	1,94	0,98	30
Satélite		22,18	28,52	26,00	1,97		
Boia	20 m	22,35	28,59	25,93	1,58	0,92	131
Satélite		22,18	28,91	26,21	1,74		
Boia	40 m	15,13	25,10	21,22	2,38	-0,34	134
Satélite		22,18	28,91	26,18	1,71		

BOIA 12° N 38° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	24,54	29,08	26,84	1,17	0,94	195
Satélite		23,94	28,82	26,56	1,35		
Boia	20 m	24,52	28,66	26,73	1,08	0,94	167
Satélite		23,94	28,82	26,50	1,36		
Boia	40 m	22,58	27,87	25,78	0,95	0,10	206
Satélite		23,94	28,82	26,55	1,39		
Boia	60 m	17,96	27,21	23,93	2,08	-0,66	208
Satélite		23,94	28,82	26,53	1,37		

BOIA 14° S 32° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	24,96	28,70	26,95	0,98	0,98	139
Satélite		24,83	29,04	26,67	1,02		
Boia	20 m	25,07	28,57	26,88	0,97	0,98	117
Satélite		24,92	29,04	26,66	1,04		
Boia	40 m	24,87	28,51	26,80	0,96	0,97	140
Satélite		24,83	29,04	26,67	1,02		
Boia	60 m	24,80	28,11	26,35	0,80	0,86	142
Satélite		24,83	29,04	26,66	1,02		
Boia	80 m	24,71	26,84	25,55	0,46	0,19	134
Satélite		24,83	29,04	26,70	1,02		

BOIA 15° N 38° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	23,55	28,54	25,92	1,31	0,96	234
Satélite		23,14	28,50	25,68	1,32		
Boia	5 m	23,79	28,03	25,88	1,28	0,96	122
Satélite		23,45	28,34	25,70	1,25		
Boia	10 m	23,79	28,40	25,97	1,30	0,96	140
Satélite		23,45	28,50	25,79	1,28		
Boia	13 m	24,08	28,38	26,22	1,22	0,97	56
Satélite		24,05	28,50	26,08	1,23		
Boia	20 m	23,49	28,34	25,95	1,27	0,96	235
Satélite		23,14	28,50	25,74	1,31		
Boia	40 m	23,45	28,15	25,66	1,10	0,91	240
Satélite		23,14	28,50	25,69	1,30		
Boia	60 m	23,10	26,78	24,71	0,75	0,28	242
Satélite		23,14	28,50	25,71	1,31		

BOIA 19 °S 34° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	23,64	29,15	26,35	1,49	0,99	155
Satélite		23,67	29,32	26,26	1,49		
Boia	5 m	23,98	29,02	26,42	1,39	0,99	80
Satélite		23,87	28,73	26,35	1,42		
Boia	10 m	23,97	28,99	26,38	1,39	0,99	82
Satélite		23,87	28,73	26,33	1,42		
Boia	20 m	23,74	29,10	26,38	1,43	0,99	126
Satélite		23,80	29,32	26,36	1,45		
Boia	40 m	23,56	29,06	26,14	1,46	0,97	145
Satélite		23,67	29,32	26,27	1,49		
Boia	60 m	23,57	28,01	25,56	1,14	0,79	134
Satélite		23,67	29,32	26,30	1,47		
Boia	80 m	23,20	26,10	24,74	0,71	0,36	101
		23,67	29,32	26,22	1,48		

BOIA 20° N 38° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	23,05	27,74	25,35	1,27	0,97	132
Satélite		23,16	27,97	25,34	1,19		
Boia	10 m	23,02	27,69	25,36	1,27	0,97	114
Satélite		23,16	27,97	25,38	1,19		
Boia	13 m	23,15	27,66	25,34	1,25	0,97	67
Satélite		23,31	27,97	25,38	1,19		
Boia	20 m	23,15	27,64	25,27	1,23	0,97	111
Satélite		23,31	27,97	25,33	1,16		
Boia	40 m	23,15	27,48	25,10	1,19	0,94	103
Satélite		23,31	27,97	25,34	1,15		
Boia	60 m	22,96	26,74	24,60	0,94	0,79	120
Satélite		23,31	27,97	25,37	1,16		
Boia	80 m	22,70	25,47	23,79	0,63	0,38	103
		23,31	27,97	25,34	1,15		

BOIA 21° N 23° W	Profundidade	MÍNIMO (°C)	MÁXIMO (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRÃO (°C)	CORRELAÇÃO (r)	No. de Dados Utilizados
Boia	1 m	20,00	26,78	23,44	1,87	0,95	124
Satélite		20,02	26,91	23,31	1,72		
Boia	10 m	20,00	26,69	23,32	1,92	0,95	114
Satélite		20,02	26,91	23,24	1,76		
Boia	13 m	19,99	26,67	23,46	1,80	0,95	104
Satélite		20,02	26,91	23,35	1,62		
Boia	20 m	19,98	26,67	23,34	1,82	0,95	117
Satélite		20,02	26,91	23,27	1,63		
Boia	40 m	19,07	26,04	22,50	1,68	0,64	117
Satélite		20,02	26,91	23,33	1,67		

Fonte: elaborada pela autora.

8.2 APÊNDICE B

Tabela 4. Métricas de erros em superfície para todas as bóias.

Bóias	ME (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)
0° N 0° E	-0,66	2,41	2,74
0° N 10° W	-0,38	0,49	0,60
0° N 23° W	-0,14	0,24	0,38
0° N 35° W	-0,02	0,18	0,23
4° N 23° W	-0,16	0,34	0,44
4° N 38° W	-0,12	0,29	0,40
6° S 10° W	-0,25	0,27	0,33
8° N 38° W	-0,21	0,39	0,49
8° S 30° W	-0,25	0,26	0,30
10° S 10° W	-0,11	0,19	0,24
12° N 23° W	-0,19	0,36	0,45
12° N 38° W	-0,29	0,44	0,24
14° S 32° W	-0,28	0,29	0,35
15° N 38° W	-0,24	0,34	0,44
19° S 34° W	-0,09	0,20	0,25
20° N 38° W	-0,02	0,23	0,29
21° N 23° W	-0,13	0,42	0,59

Fonte: Elaborada pela autora.