



MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

2º TEN BERNARDO **VILLAS** BÔAS DOS SANTOS

NITERÓI, RJ

2023

Bernardo Villas Bôas dos Santos

ESTUDO DAS PROPRIEDADES METEOCEANOGRÁFICAS NA BORDA DA  
PLATAFORMA CONTINENTAL DE SANTOS (SP): VARIAÇÕES DIURNAS,  
SINÓTICAS E SAZONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luiz Coelho

Niterói-RJ

2023

SANTOS, Bernardo Villas Bôas.

Estudo das propriedades meteoceanográficas na borda da plataforma continental de Santos (SP): Variações Diurnas, Sinóticas e Sazonais/ Bernardo Villas Bôas dos Santos. – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2023.

xxii, 120 f.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Prof. Dr. Alexandre Luiz Coelho

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 111-113

1. Plataforma continental de Santos. 2. TSM. 3. TAR2M. 4. UR2M. 5. Fluxo de calor latente. 6. Fluxo de calor sensível. 7. Variação diurna. 8. Variação sinótica. 9. Variação sazonal. 10. ERA5 I. Prof. Dr. Alexandre Luiz Coelho. II. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. III. Variação meteoceanográfica diurna, sinótica e sazonal da borda da plataforma continental de Santos (SP).

ESTUDO DAS PROPRIEDADES METEOCEANOGRÁFICAS NA BORDA DA  
PLATAFORMA CONTINENTAL DE SANTOS (SP): VARIAÇÕES DIURNAS,  
SINÓTICAS E SAZONAIS

Bernardo Villas Bôas Dos Santos

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE E TÉCNICO DO CENTRO DE  
INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA MARINHA  
DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

---

Prof. Alexandre Luiz Coelho, D.Sc.

---

Prof. Fabíola Valéria Barreto Teixeira, D.Sc.

---

CC Elias de Castro Nadaf, M.Sc.

NITERÓI, RJ BRASIL  
OUTUBRO DE 2023

## **Agradecimentos**

Primeiramente, minha eterna gratidão a Deus, que desde a minha infância me deu força e sempre guiou os meus caminhos, tal qual uma bússola que indica a direção a ser seguida. Sem Sua presença constante em minha vida, nada disso teria sido possível.

Ao meu pai, Robson, agradeço por ter me criado para ser uma pessoa de caráter íntegro e honesto. O seu exemplo de vida é uma inspiração que carrego comigo em cada passo da minha jornada. À minha mãe, Marcia, agradeço o suporte incondicional e os sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar aonde estou hoje. Obrigado por sempre acreditar em mim, mesmo quando outros duvidaram, e por ser minha maior incentivadora.

Aos meus irmãos, Daniel e René, meu eterno agradecimento por estarem sempre ao meu lado. Vocês são mais do que irmãos; são verdadeiros amigos e companheiros de vida. À minha esposa, Hellen, minha amiga, meu porto seguro e meu lar, agradeço por todo amor, carinho e paciência. Seu apoio tem sido alicerce firme em minha vida, permitindo-me enfrentar os desafios com mais confiança e serenidade.

Ao meu orientador, Professor Doutor Alexandre Luiz Coelho, expresso minha profunda gratidão pela sua honestidade de propósito, dedicação e comprometimento incansáveis. Seu anseio pela excelência me motivou a buscar sempre fazer o melhor. Por fim, gostaria de agradecer ao corpo docente do CIAARA, que contribuiu de maneira significativa para a minha formação acadêmica e profissional. Vocês forneceram as ferramentas e o conhecimento que me possibilitaram tornar-me um Hidrógrafo da Marinha do Brasil.

ESTUDO DAS PROPRIEDADES METEOCEANOGRÁFICAS NA BORDA DA  
PLATAFORMA CONTINENTAL DE SANTOS (SP): VARIAÇÕES DIURNAS,  
SINÓTICAS E SAZONAIS

Bernardo Villas Bôas Dos Santos

Outubro/2023

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luiz Coelho

Programa: Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia

Compreender as variações meteoceanográficas em diferentes escalas temporais na Bacia de Santos é fundamental para prever e mitigar riscos relacionados às condições meteorológicas, apoiar operações marítimas de defesa, impulsionar atividades econômicas como pesca e exploração de petróleo e gás, e validar e aprimorar modelos climáticos regionais. Este trabalho analisa as variações meteoceanográficas nas escalas diurnas, sinóticas e sazonais na borda da Plataforma Continental de Santos (SP), utilizando dados da Boia Meteoceanográfica do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), que foram submetidos aos testes de controle de qualidade do *Quality control of real time oceanographic Data* (QARTOD). Foram analisados principalmente os seguintes dados: temperatura do ar (TAR2M), temperatura superficial do mar (TSM), pressão atmosférica ao nível do mar (PNMM), Umidade relativa (UR2M) e específica (q2M) e magnitude do vento (V10M). Foi utilizada a transformada inversa de Fourier para decompor o sinal de cada propriedade em 4 bandas de frequência: diurna (2 h - 24 h), sinótica (1 d - 30 d), intrasazonal (30 d a 90 d) e sazonal (90 d a 365 d). O ciclo diurno de todas as propriedades foi marcado pela frequência diurna, exceto a PNMM que apresenta a maré barométrica com períodos de 12 h. A TSM e a TAR2M tiveram forte correlação de Pearson (0,87), com ciclos diurnos associados com a variação da radiação solar e com a rotação

da Terra. As amplitudes da TSM são menores que as de TAR2M, provavelmente por causa da maior capacidade térmica do oceano. O ciclo diurno de UR2M esteve em fase oposta com o de TAR2M, com a máxima UR2M associada com a mínima TAR2M e vice-versa. Utilizando fórmulas bulk dos algoritmos do COARE3.6, foram calculados os fluxos de calor latente (LH) e sensível (SH) com base em V10M e nas diferenças de temperatura e umidade. No ciclo diurno, as maiores perdas de LS e SH ocorreram no final da tarde e início da noite, implicando em maior evaporação e resfriamento da TSM. Na escala sinótica, todas as variáveis demonstram variações significativas após a passagem de sistemas frontais, associadas com o ar frio e seco transportado pela alta migratória pós frontal. Com exceção de TSM e TAR2M, todas as propriedades tiveram maior energia espectral na escala sinótica. As variações sinóticas de LH e SH dependeram tanto de V10M quanto das diferenças de umidade e de temperatura entre a superfície do mar e a altitude de 2 m. Já as variações sazonais desses fluxos de calor dependeram principalmente da componente termodinâmica. Os sinais sazonais da TSM e TAR2M são bem representados por uma senoide com período de 1 ano. V10M foi a única propriedade com variância diurna superior à sazonal. Além disso, os dados coletados pela Boia Meteoceanográfica de Santos foram comparados com os dados de reanálise, uma base de dados atmosféricos amplamente reconhecida. Os dados do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast Reanalysis version 5* (ERA5) apresentam correlação muito forte com os dados observados, sugerindo sua aplicabilidade na região de estudo. Além disso, os dados de reanálise também aproximaram corretamente os valores de TSM, superestimaram TAR2M e PNMM, e subestimaram V10M.

**Palavras-Chave:** Variações meteoceanográficas, Plataforma Continental de Santos; Programa Nacional de Boias (PNBOIA); Quality control of real time oceanographic Data (QARTOD); Temperatura superficial do mar (TSM); Pressão atmosférica ao nível do mar (PNMM); Umidade relativa (UR2M); Transformada inversa de Fourier, Fluxos de calor latente (LH) e sensível (SH); Escalas diurnas, sinóticas e sazonais; European Centre for Medium-Range Weather Forecast Reanalysis version 5 (ERA5).

STUDY OF METEOROLOGICAL AND OCEANOGRAPHIC PROPERTIES AT THE  
EDGE OF THE SANTOS CONTINENTAL SHELF (SP): DIURNAL, SYNOPTIC, AND  
SEASONAL VARIATIONS

Bernardo Villas Bôas Dos Santos

October/2023

Advisor: Prof. Dr. Alexandre Luiz Coelho

Program: Hydrographic Course for Officers

Understanding meteorological and oceanographic variations on different time scales in the Santos Basin is essential for predicting and mitigating risks related to weather conditions, supporting maritime defense operations, promoting economic activities like fishing, and oil and gas exploration, and for validating and improving regional climate models. This study examines meteorological and oceanographic variations on diurnal, synoptic, and seasonal scales at the edge of the Santos Continental Shelf (SP). Data from the National Buoy Program's Meteorological Buoy (PNBOIA) were used, subjected to the Quality Control of Real-Time Oceanographic Data (QARTOD) tests. Primarily the following data were analyzed: air temperature (2MAT), sea surface temperature (SST), sea-level atmospheric pressure (SLP), relative humidity (2MRH), specific humidity (2MSH), and wind speed (10MWS). The inverse Fourier transform was employed to decompose the signal of each property into four frequency bands: diurnal (2 h - 24 h), synoptic (1 d - 30 d), intraseasonal (30 d - 90 d), and seasonal (90 d - 365 d). The diurnal cycle of all properties was marked by diurnal frequency, except for SLP which displays a barometric tide with periods of 12 h. SST and 2MAT had a strong Pearson correlation (0.87), with diurnal cycles associated with the variation of solar radiation and Earth's rotation. The amplitudes of SST are smaller than those of 2MAT, probably due to the ocean's

higher heat capacity. The diurnal cycle of RH<sub>2M</sub> was in the opposite phase to that of 2MAT, with maximum RH<sub>2M</sub> associated with minimum 2MAT and vice versa. Using bulk formulas from the COARE3.6 algorithms, latent (LH) and sensible (SH) heat fluxes were calculated based on 10MWS and temperature and humidity differences. In the diurnal cycle, the highest losses of LH and SH occurred in late afternoon and early evening, implying higher evaporation and cooling of SST. On the synoptic scale, all variables showed significant variations after the passage of frontal systems, associated with the cold and dry air transported by the post-frontal migratory high. Except for SST and 2MAT, all properties had higher spectral energy at the synoptic scale. Synoptic variations in LH and SH depended both on 10MWS and on humidity and temperature differences between the sea surface and the 2m altitude. Seasonal variations in these heat fluxes mainly depended on the thermodynamic component. Seasonal signals of SST and 2MAT are well represented by a sine wave with a one-year period. 10MWS was the only property with diurnal variance greater than seasonal. Moreover, the data collected by the Santos Meteorological Buoy were compared with reanalysis data, a widely recognized atmospheric database. Data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis version 5 (ERA5) show a very strong correlation with observed data, suggesting its applicability in the study region. The model also accurately approximated SST values, overestimated 2MAT and SLP, and underestimated 10MWS.

**Keywords:** Metocean Variations; Santos Continental Shelf, National Buoy Program (PNBOIA); Quality Control of Real Time Oceanographic Data (QARTOD); Sea Surface Temperature (SST); Sea-Level Atmospheric Pressure (SLAP); Relative Humidity (2MRH); Inverse Fourier Transform, Latent and Sensible Heat Fluxes (LH and SH); Diurnal, Synoptic and Seasonal Scales; European Centre for Medium-Range Weather Forecast Reanalysis version 5 (ERA5).

## Lista de ilustrações

Figura 1.1 - Principais feições geológicas da Bacia de Santos.....	11
Figura 1.2 - Climatologia sazonal (1991-2020) da PNMM (a cada 1 hPa) elaborada a partir do ERA5 para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.....	14
Figura 1.3 - Climatologia sazonal (1991-2020) da TAR2M (a cada 1°C) elaborada a partir do ERA5 para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.....	15
Figura 1.4 - Climatologia (1991-2010) da UR2M (%) ERA5 (linha cheia) (a) ciclo anual e (b) ciclo diurno.....	16
Figura 1.5 - Climatologia sazonal (1991-2020) de V10M (sombreado em m.s-1) e linhas de corrente a 10 m de altura, elaborada a partir do ERA5 para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, e (d) primavera.....	17
Figura 1.6 - Climatologia (1991-2020) da V10M (m.s-1) obtida com ERA5: (a) ciclo anual e (b) ciclo diurno.....	18
Figura 3.1 - Bacia de Santos e Plataforma Continental Sudeste (PCSE).....	25
Figura 3.2 - Desenho esquemático da boia de Santos.....	26
Figura 3.3 - Dados brutos com flag de ausência.....	29
Figura 3.4 – Eliminação de dados consecutivos.....	30
Figura 3.5 - Eliminação de Spikes.....	31
Figura 4.1 – Série temporal da temperatura da superfície do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	41
Figura 4.2 - Histograma da Série temporal da temperatura da superfície do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	42
Figura 4.3 - Espectro de amplitude da Série temporal da temperatura da superfície do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	43
Figura 4.4 - Série temporal da temperatura ar a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	44
Figura 4.5- Cartas sinóticas do centro de hidrografia da marina para 02072011_12Z e 03072011_00Z.....	45
Figura 4.6 - Histograma da Série temporal da temperatura ar a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	46
Figura 4.7 - Climatologia Anual TAR2M (1991-2022) calculada com dados do ERA5.....	47
Figura 4.8 - Espectro de Amplitude da Série temporal da temperatura ar a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	48
Figura 4.9 - Série temporal da umidade relativa a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	49
Figura 4.10 - Histograma Série temporal da umidade relativa a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	50
Figura 4.11 - Climatologia Anual UR2M (1991-2022) calculada com dados do ERA5.....	51
Figura 4.12 - Espectro da Amplitude Série temporal da umidade relativa a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	52
Figura 4.13 - Espectro da Amplitude da Série temporal da umidade específica a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	53
Figura 4.14 - Histograma de dados da Série temporal da umidade específica a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	54
Figura 4.15 - Série temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	55
Figura 4.16 - Cartas sinóticas 01012012_12Z e 02012011_00Z.....	56

Figura 4.17 - Histograma de dados da Série temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012 .....	57
Figura 4.18 - Climatologia Anual PNMM (1991-2022) calculada com dados do ERA5 .....	58
Figura 4.19 - Espectro de amplitude da Série temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012 .....	59
Figura 4.20- Série temporal da intensidade do vento a 10 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012 .....	60
Figura 4.21- Climatologia Anual V10M (1991-2022) calculada com dados do ERA5 .....	61
Figura 4.22 - Espectro de amplitude da série temporal da intensidade do vento a 10 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012 .....	62
Figura 4.23 - Climatologia Anual V10M (1991-2022) calculada com dados do ERA5 .....	63
Figura 4.24 - Distribuição de frequência da ocorrência direcional do vento .....	64
Figura 4.25 - Série temporal dos fluxos de calor no período de 21/06/2011 a 20/06/2012.....	65
Figura 4.26 - Histogramas das Séries temporais dos fluxos de calor no período de 21/06/2011 a 20/06/2012 .....	66
Figura 4.27 - Ciclo Diurno da Temperatura superficial do mar .....	67
Figura 4.28 - Ciclo Diurno da TSM para cada estação.....	68
Figura 4.29 - Ciclo Diurno da intensidade do vento para cada estação.....	69
Figura 4.30 - Ciclo Diurno da Temperatura do ar a 2 metros.....	70
Figura 4.31 - Ciclo Diurno da temperatura do ar a 2m para cada estação.....	71
Figura 4.32 - Ciclo Diurno da Umidade relativa a 2 metros .....	72
Figura 4.33 - Ciclo Diurno da Umidade específica a 2 metros .....	73
Figura 4.34 - Ciclo Diurno da TAR2M x UR2M .....	74
Figura 4.35 - Ciclo Diurno da UR2M x q2M.....	75
Figura 4.36 - Ciclo Diurno da UR2M para cada estação.....	76
Figura 4.37 - Ciclo Diurno da q2M para cada estação .....	77
Figura 4.38 - Ciclo Diurno da Pressão atmosférica ao nível médio do mar.....	78
Figura 4.39 - Ciclo Diurno da PNMM para cada estação .....	79
Figura 4.40 - Ciclo Diurno do Vento a 10 metros.....	80
Figura 4.41 - Ciclo Diurno do Fluxo de calor latente.....	81
Figura 4.42 - Ciclo Diurno do Fluxo de calor latente para cada estação.....	82
Figura 4.43 - Diferença entre q2M e umidade específica superficial.....	83
Figura 4.44 - Ciclo Diurno do Fluxo de calor Sensível.....	84
Figura 4.45 - Reconstrução dos sinais frente fria 03/07/2011 .....	87
Figura 4.46 - Reconstrução Sinais Frente fria 02/08/2011 .....	89
Figura 4.47 - Anomalia de TAR2M para cada escala de estudo.....	91
Figura 4.48 - Ciclo anual TAR2M.....	92
Figura 4.49 - Anomalia de TSM para cada escala de estudo.....	93
Figura 4.50 - ciclo anual TSM.....	94
Figura 4.51 - Anomalia de PNMM para cada escala de estudo.....	95
Figura 4.52 - Ciclo anual da PNMM .....	96
Figura 4.53 - Anomalia de q2M para cada escala de estudo .....	97
Figura 4.54 - Anomalia de UR2M para cada escala de estudo.....	98
Figura 4.55 - Ciclo anual q2M.....	99
Figura 4.56 - Ciclo anual UR2M.....	100
Figura 4.57 - Anomalia de V10M para cada escala de estudo.....	101
Figura 4.58 - Ciclo anual do vento a 10 metros.....	102
Figura 4.59 - Anomalia Dos fluxos de calor latente para cada escala de estudo.....	103
Figura 4.60 - Anomalia dos fluxos de calor sensível para cada escala de estudo .....	104



## Lista de Quadros

Quadro 1-Testes de Controle de Qualidade .....	28
Quadro 2 - Limites de aquisição pré-definidos pelos fabricantes dos sensores .....	31
Quadro 3 - Valores máximos de desvio aceitáveis .....	32
Quadro 4 - Percentuais de contribuição das variâncias de cada banda de frequência, para cada variável meteoceanográfica, em relação a variância total. ....	40
Quadro 5 - Parâmetros Estatísticos da Temperatura Superficial do Mar.....	42
Quadro 6 - Parâmetros Estatísticos da Temperatura do ar a 2 metros.....	45
Quadro 7 - Parâmetros Estatísticos da Umidade relativa a dois metros.....	50
Quadro 8 - Parâmetros Estatísticos da Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar .....	57
Quadro 9 - Parâmetros Estatísticos do Vento a 10 metros.....	61
Quadro 10 - Parâmetros Estatísticos dos fluxos de calor latente e sensível.....	66
Quadro 11 - Estatística descritiva dos dados de TSM do ERA5 e da boia de Santos .....	105
Quadro 12 Estatística descritiva dos dados de TAR2M do ERA5 e da boia de Santos.....	105
Quadro 13 Estatística descritiva dos dados de PNMM do ERA5 e da boia de Santos .....	106
Quadro 14 Estatística descritiva dos dados de V10M do ERA5 e da boia de Santos .....	106
Quadro 15 Estatística descritiva dos dados de fluxo do calor latente do ERA5 e da boia de Santos.....	107
Quadro 16 Estatística descritiva dos dados de fluxo do calor sensível do ERA5 e da boia de Santos.....	107

# Sumário

Lista de ilustrações .....	x
Lista de Quadros.....	xiii
Sumário.....	xiv
1 Introdução.....	11
1.1 A Região de Estudo.....	11
1.2 Características Meteoceanográficas da BS e da PCSE .....	12
1.2.1 Meteorologia .....	12
1.2.2 Oceanografia .....	18
1.3 Plano Nacional de Boias (PNBOIA).....	19
1.4 Fluxos de calor.....	20
2 Objetivos .....	22
3 Dados e Métodos.....	24
3.1 Dados .....	24
3.1.1 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5 (ERA5).....	26
3.2 Métodos.....	27
3.2.1 Controle da Qualidade de Dados .....	27
3.2.2 Análise Estatística.....	32
3.2.3 Análise Espectral.....	35
3.2.4 Transformada Inversa de Fourier .....	36
3.2.5 Cálculo dos Fluxos de Calor .....	37
4 Resultados e discussões.....	40
4.1 Estatística e Análise espectral .....	40
4.1.1 TSM.....	41
4.1.2 TAR2M.....	44
4.1.3 UR2M E q2M .....	49
4.1.4 PNMM .....	54
4.1.5 V10M e DIR10M .....	59
4.1.6 Fluxos de calor latente e Calor sensível .....	64
4.2 Ciclos Diurnos das propriedades meteoceanográficas.....	66
4.2.1 TSM.....	66
4.2.2 TAR2M.....	69
4.2.3 UR2M e q2M .....	71
4.2.4 PNMM .....	77
4.2.5 V10M.....	79
4.2.6 Fluxos de calor latente e Calor sensível .....	80
4.3 Variabilidade Sinótica .....	84
4.3.1 Frente Fria de 03/07/11 às 00h .....	85

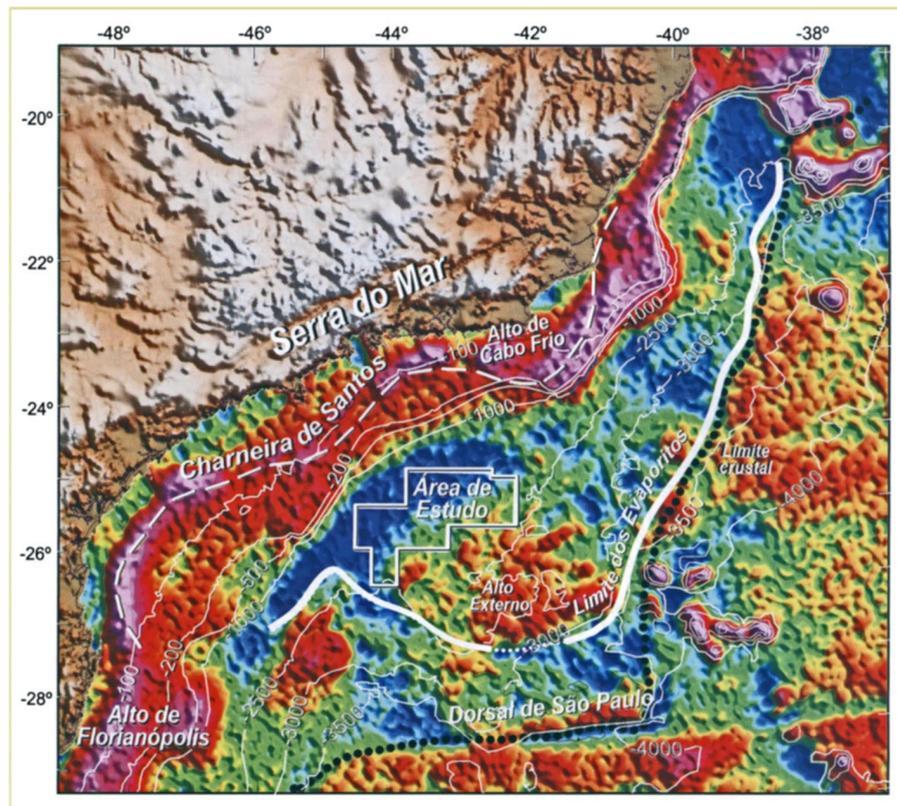
4.3.2	Frente Fria de 02/08 às 18h.....	88
4.4	Variabilidade Sazonal.....	90
4.4.1	TAR2M.....	91
4.4.2	TSM.....	92
4.4.3	PNMM .....	94
4.4.4	UR2M e q2M .....	96
4.4.5	V10M .....	100
4.4.6	Fluxos de calor latente e de calor Sensível .....	102
4.5	Comparação entre os Dados do ERA5 e Dados da Boia do PNBOIA .....	104
5	Conclusões e recomendações .....	108
6	Referências Bibliográficas .....	113

# 1 Introdução

## 1.1 A Região de Estudo

A Bacia de Santos (BS) é uma região marítima localizada no Oceano Atlântico sudoeste, estendendo-se desde as linhas de costa dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, até aproximadamente a isóbata de 3000 m, totalizando assim uma área de aproximadamente 352.000 km<sup>2</sup> (Figura 1.1), que geologicamente está limitada ao norte pelo Alto de Cabo Frio, e ao sul pelo Alto de Florianópolis\Dorsal de São Paulo, a leste pelo limite oriental do Platô de São Paulo, e a oeste, pela linha de costa. (HERCOS, *et al.*, 2022) (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

Figura 1.1 - Principais feições geológicas da Bacia de Santos



Fonte: Extraído de HERCOS, SCHREINER, *et al.*, 2022

Uma importante região de estudos meteoceanográficos que está localizada na BS é a Plataforma Continental Sudeste (PCSE), que se estende por 1100 km entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta (SC), tendo uma topografia suave (COELHO,2022). Usualmente, a isóbata de 200 m é utilizada como limite externo ou borda da PCSE (COELHO,2022; CASTRO et al,2015). Nessa borda externa, foram obtidos os dados meteoceanográficos que serão analisados no presente trabalho.

Dentre as atividades econômicas desenvolvidas na Bacia de Santos pode-se destacar a Produção de Petróleo e gás. A partir de 2006 esta atividade foi intensificada pela Petrobras dado a descoberta de grandes reservas de petróleo no Pré-Sal (SILVA, 2019). Atualmente a Bacia de Santos é responsável por 73% da produção de petróleo e 76% da produção de gás no Brasil (ANP, 2023).

A BS dá acesso ao Porto de Santos, que é o maior porto da América Latina, caracterizando uma porta de entrada e saída de grande parte das mercadorias que circulam pelo Brasil (HILSDORF e NETO, 2016; PORTO DE SANTOS, 2023). Tendo em vista essa relevância econômica da BS, muitos trabalhos científicos vêm sendo realizados na PCSE com o propósito de conhecer a cinemática e a dinâmica da Corrente do Brasil (SOUZA, 2000), a distribuição espacial das massas de água (GODOI, 2005; CASTRO *et al*, 2015; CARVALHO, 2019; MEDEIROS, 2020; COELHO, 2022) bem como o estudo temporal e espacial da TSM e de variáveis meteorológicas tais como temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica ao nível do mar (DERECZYNSKI. et al, 2022).

## **1.2 Características Meteoceanográficas da BS e da PCSE**

### **1.2.1 Meteorologia**

O clima de uma determinada região oceânica é caracterizado por fatores como sua posição geográfica, pelos sistemas meteorológicos que atuam nessa área, bem como pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) que afeta a temperatura do ar na interface oceano-atmosfera (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022). As variações destes fatores podem ocorrer em diversas escalas temporais, tais como: diárias, sinóticas e sazonais, entre outras (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022; LEONARDO, 2010).

A região litorânea adjacente à BS tem um clima classificado como oceânico subtropical úmido sem estação seca (Cf) de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES, *et al.*,

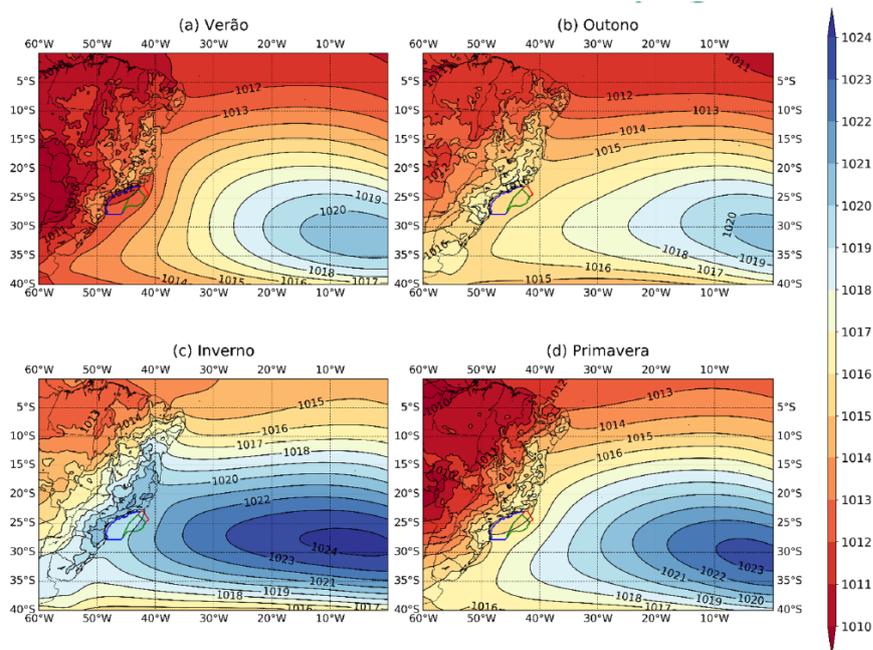
2013). A caracterização desse clima se deve às forçantes meteorológicas que atuam na área, bem como aos fluxos de calor( $J/m^2$ ) na interface oceano-atmosfera, influenciando na temperatura do ar, na umidade, na nebulosidade, nos ventos (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

Dentre os sistemas meteorológicos de escala sinótica que se deslocam sobre o oceano Atlântico sul pode-se observar o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), os Sistemas Frontais (SF's), os Ciclones Extratropicais (CEs), os Ciclones Subtropicais (CSs), os Vórtices desprendidos ou Cut Off Lows (COLs) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Há também na escala intrasazonal os Complexos Convectivos de Mesoescala (CMMs) e os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

De acordo com a Organização meteorológica Mundial (OMM) para se obter uma “Normal Climatológica Padrão” é necessário a média de uma variável ao longo de períodos consecutivos de 30 anos, como por exemplo de 1931 até 1960, de 1961 até 1990 e assim sucessivamente. Já a “Média Climatológica” é feita com dados consecutivos de no mínimo 10 anos. Como a maior série de dados meteoceanográficos observados para a BS possui 5 anos, então Dereczynski et al. (2022), após compararem esses dados com dados de modelos numéricos, verificaram que eles têm alta correlação ( $> 0,9$ ) com os dados de reanálise ERA5 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Sendo assim, as normais climatológicas relativas ao período de 1991 a 2020 foram obtidas a partir dos dados de reanálise do ERA5 para as seguintes propriedades: temperatura do ar a 2m (TAR2M) em graus Célsius( $^{\circ}C$ ), umidade relativa do ar a 2 m (UR2M) percentual (%), pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM) em Hectopascal (hPa) e vento a 10 m de altura (V10M) em metros por segundo(m/s).

Desse trabalho destaca-se o posicionamento climatológico sazonal do centro do ASAS com PNMM de 1020 hPa, que no verão fica mais ao Sul e afastado do continente (Figura 1.2), os menores valores de PNMM na BS (entre 1012 e 1013 hPa). No outono as bordas do ASAS aproximam-se do continente sul-americano, com os valores aumentando na BS (entre 1015 e 1016 hPa). Durante o Inverno o ASAS está mais próximo do continente sul-americano, em sua posição mais ao norte, concomitante com os maiores valores médios da PNMM na BS (entre 1019 e 1020 hPa). Já na primavera a PNMM sobre a BS diminui (para valores entre 1016 e 1017hPa) com o centro do ASAS tendo pressão máxima (1024 hPa). O comportamento anual da PNMM se aproxima mais com o comportamento de primavera estando o centro do ASAS com 1022 hPa, localizado aproximadamente em  $3^{\circ}W/30^{\circ}S$  (DERECZYNSKI, *et al.* 2022).

Figura 1.2 - Climatologia sazonal (1991-2020) da PNMM (a cada 1 hPa) elaborada a partir do ERA5 para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera



Fonte: Extraído de DERECZYNSKI et al., 2022

Os ciclos sazonais obtidos por Dereczynski et al. (2022) estão apresentados na Figura 1.3, podendo-se observar que a PNMM (hPa) varia de 1012 hPa no verão para 1022 hPa no inverno, tendo valores de 1015 a 1016 hPa nas estações intermediárias. Já o ciclo diurno é marcado pela presença de dois mínimos e dois máximos, sendo chamada de maré semidiurna da pressão atmosférica (Miguens, 2019). De acordo com Vianelo & Alves (1991), na região sudeste os mínimos diários de PNMM ocorrem às 04 h e 16 h local, enquanto os máximos ocorrem às 10 h e 22 h local. De acordo com Dereczynski et al. (2022) o ERA5 acerta os horários dos máximos e mínimos do ciclo diurno da PNMM e simula corretamente o mínimo de 16h com valor um pouco mais baixo do que às 04 h e máximo de 10 h ligeiramente maior do que o máximo de 22 h, o que também foi observado nas Bacias de Campos e do Espírito Santo (DERECZYNSKI et al. 2019).

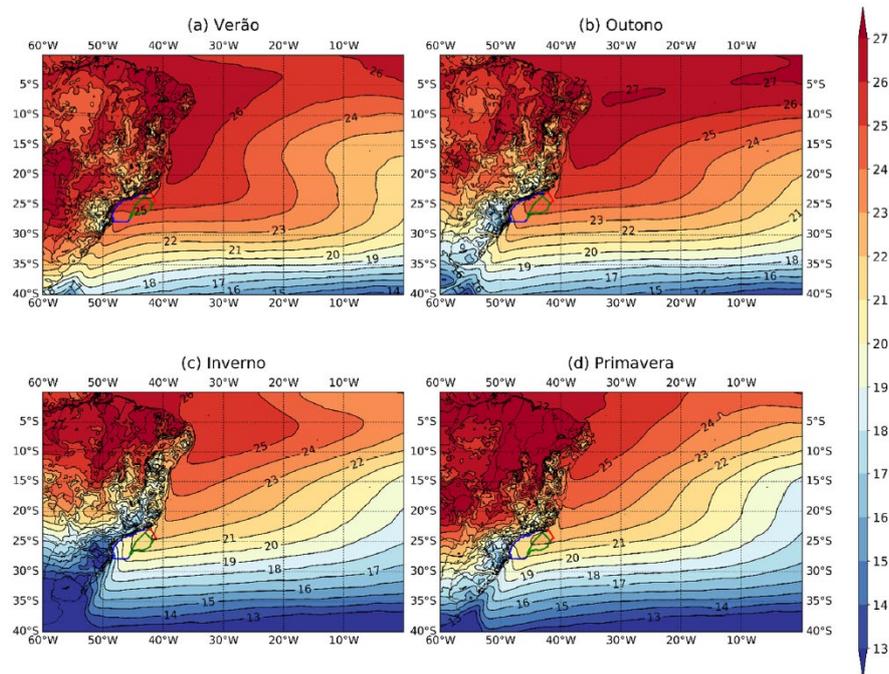
Com relação aos dados de TAR2M ressalta-se o seu gradiente norte-sul, resultado das diferenças entre as quantidades de radiação que chegam no polo e no equador. A variação zonal do gradiente de da TAR2M entre a costa brasileira e a longitude 30°W é pequena, contudo, há uma grande diferença entre a temperatura do ar sobre a superfície oceânica e a continental, em virtude dos diferentes valores de calor específico destas regiões. Também é possível observar em todas as estações do ano a presença de uma crista nas isotermas próxima a costa brasileira, que está associada à TSM que é maior próximo da costa brasileira e por conseguinte atua como

fonte de calor, aquecendo o ar mais próximo da superfície.

A TAR2M tem menor variação na BS durante o verão ( $24^{\circ}\text{C} \leq T \leq 25^{\circ}\text{C}$ ) e o outono ( $23^{\circ}\text{C} \leq T \leq 24^{\circ}\text{C}$ ). As maiores diferenças de temperatura do ar ocorrem no inverno ( $18 \leq T \leq 22^{\circ}\text{C}$ ) e na primavera ( $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 22^{\circ}\text{C}$ ) (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

Os ciclos sazonais da TAR2M( $^{\circ}\text{C}$ ) na BS (Figura 1.3) apresenta um mínimo de  $20^{\circ}\text{C}$  em julho e agosto, tendo um máximo de  $25,7^{\circ}\text{C}$  em fevereiro. Já o ciclo diurno simulado pelo ERA5, exibe um mínimo um pouco antes do nascer do sol, às 5 h local (8 UTC); o máximo ocorre 3 a 4 h após o máximo de incidência da radiação solar, isto é, entre 15 h e 16 h (18 a 19 UTC) (DERECZYNSKI *et al.* 2022).

Figura 1.3 - Climatologia sazonal (1991-2020) da TAR2M (a cada  $1^{\circ}\text{C}$ ) elaborada a partir do ERA5 para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera



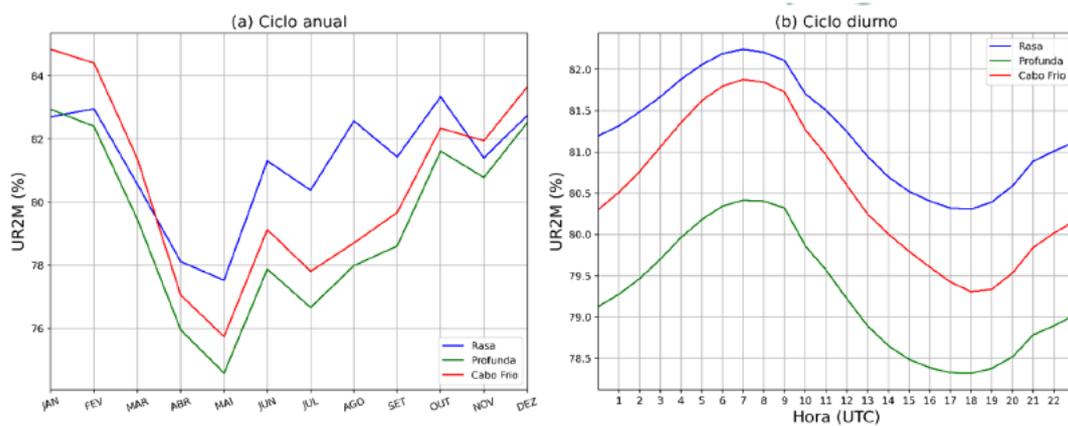
Fonte: Extraído de DERECZYNSKI *et al.*, 2022

No que diz respeito a UR2M (%) salienta-se que não há grandes variações espaciais e temporais sobre o oceano. Esta variável é função da temperatura e função da quantidade de vapor d'água, logo, uma vez que a atmosfera recebe constantemente umidade por parte do oceano a mudança dos valores de UR2M são influenciadas principalmente pela variação da temperatura do ar. A região equatorial, por ser mais aquecida, é capaz de conter maiores quantidades de vapor d'água, e o oceano, também mais aquecido, libera mais vapor para atmosfera, portanto é nesta região que são encontrados os maiores valores de umidade relativa. As variações sazonais da UR2M apresentam o mesmo comportamento das variações da

TAR2M, dado a relação entre ambas. Ao longo do ano a UR2M sobre a BS varia entre 75% e 85%, tendo valores médios acima de 80% no verão. (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

Com relação ao ciclo anual (Figura 1.4 a), o mínimo ocorre em maio e o máximo em janeiro e fevereiro. O ciclo diurno (Figura 1.4 b) exhibe a redução da UR2M ao longo do dia à medida que a temperatura se eleva, enquanto o máximo ocorre durante a madrugada.

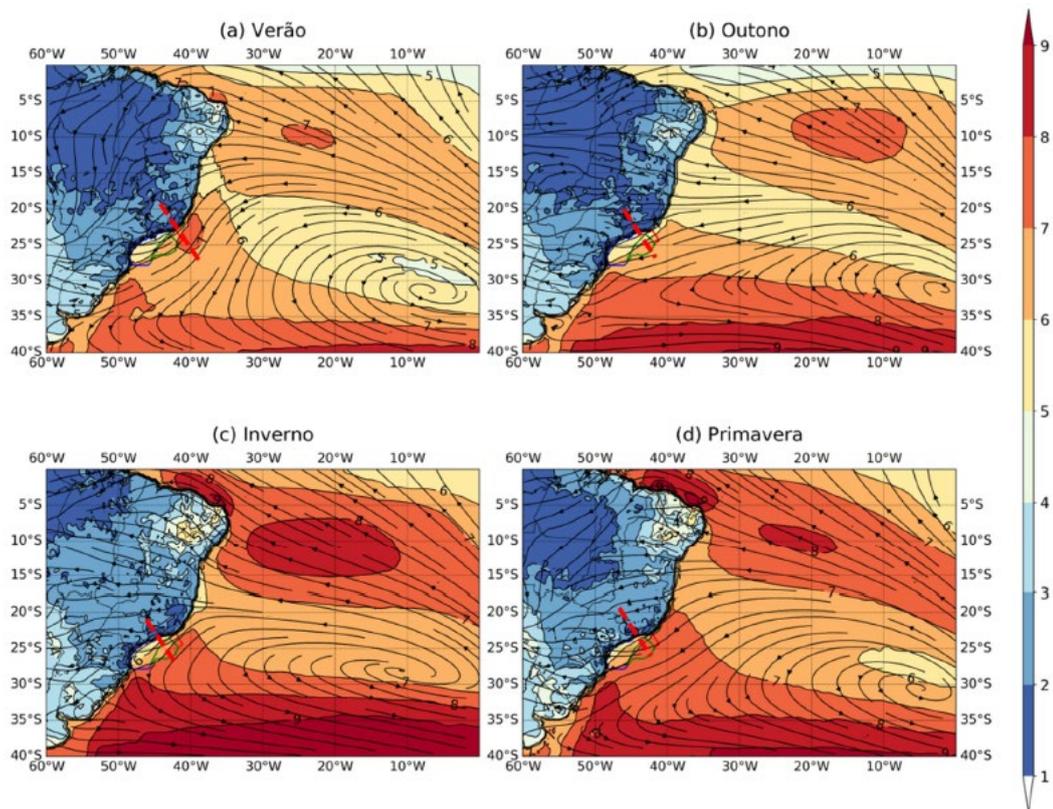
Figura 1.4 - Climatologia (1991-2010) da UR2M (%) ERA5 (linha cheia) (a) ciclo anual e (b) ciclo diurno.



Fonte: Extraído de DERECZYNSKI *et al.*, 2022

Por fim, a climatologia sazonal de V10M (Figura 1.5) indica que a direção predominante do vento na costa sudeste do Brasil, que ao longo de todo o ano fica situada na borda oeste do ASAS, é nordeste (NE). Há também a presença de um cavado invertido sobre a BS, onde os ventos têm curvatura ciclônica. Este cavado é mais pronunciado no verão e primavera quando comparado ao outono e inverno. No tocante a intensidade do vento, próximo ao litoral as velocidades são mais baixas enquanto as velocidades mais altas estão próximo de Cabo-Frio e mais distante da costa. Durante a primavera e inverno ocorrem os maiores valores da Magnitude do vento a 10m(V10M) entre 6 e 7m/s, por causa dos maiores gradientes de pressão nestes períodos do ano, enquanto o mínimo ocorre no outono, quando o ASAS se afasta da costa sul-americana. (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

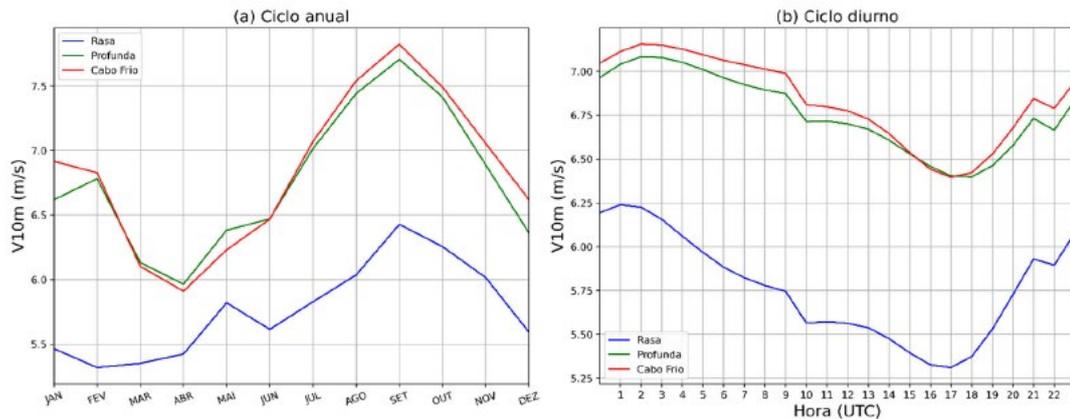
Figura 1.5 - Climatologia sazonal (1991-2020) de V10M (sombreado em m.s-1) e linhas de corrente a 10 m de altura, elaborada a partir do ERA5 para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, e (d) primavera



Fonte: Extraído de DERECZYNSKI et al., 2022

No ciclo anual da V10M (Figura 1.6 a), a intensidade do vento aumenta de 5,6 m/s em junho até 6,6 m/s setembro, diminuindo desde então até atingir 5,9 m/s em novembro. O ciclo diurno (Figura 1.6 b) apresenta o mínimo entre 17 e 18 UTC (14 e 15 h local), com o máximo entre 23 e 01 UTC, 20 e 22 h local (DERECZYNSKI et al.,2022).

Figura 1.6 - Climatologia (1991-2020) da V10M (m.s-1) obtida com ERA5: (a) ciclo anual e (b) ciclo diurno.



Fonte: Extraído de DERECZYNSKI et al., 2022

### 1.2.2 Oceanografia

Na Região sudoeste do Atlântico Sul existe uma estratificação vertical até 3500m de diferentes massas de água, a qual consequentemente também é observada na BS. Em regiões ao largo da isóbata de 200m, considerando os primeiros 3500 metros temos: Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água intermediária Antártica (AIA); Água circumpolar Superior (ACS); Água profunda do Atlântico Norte (APAN); e Água Circumpolar inferior (ACI) (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

A AT está na camada mais superficial do oceano na BS e se estende até cerca 130m, possuindo os maiores valores médios de temperatura e salinidade, respectivamente  $23,13^{\circ}\text{C} \pm 2,02^{\circ}\text{C}$  e  $36,98 \text{ g/kg} \pm 0,27\text{g/k}$ . Em virtude da influência do ciclo sazonal na camada superficial a temperatura da AT na BS no verão é cerca de  $1^{\circ}\text{C}$  maior e a salinidade é  $0,4 \text{ g/kg}$  menor em relação ao inverno (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022).

Ao longo da PCSE a Corrente do Brasil (CB) ocupa os primeiros 500 metros da coluna d'água, transportando a AT, na camada superficial, e a ACAS na termoclina. A CB tem direção Sul/Sudoeste e está presente em toda BS, ela escoando sobre a Plataforma Continental Externa e sobre o talude tendo o seu eixo sobre a isóbata de 1000 m (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022). Entretanto, quando a CB meandra ela pode atingir porções mais internas da PCSE, assim como regiões mais externas do talude (PALÓCZY, *et al.*, 2016). Souza (2000) estudando a CB ao largo de Santos, observou escoamentos predominantes para SW abaixo de 30 metros de profundidade. Velocidades superficiais da CB excedem  $0,55 \text{ m/s}$  (DERECZYNSKI, *et al.*,

2022).

### **1.3 Plano Nacional de Boias (PNBOIA)**

O PNBOIA foi implementado a partir de dois subprogramas complementares de boias, em face da extensa área de responsabilidade do Brasil, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), para efeito de monitoramento e previsão do tempo, assim como os fenômenos meteorológicos e oceanográficos e dos regimes climáticos observados no Brasil.

O monitoramento é realizado através de boias de deriva. As boias de deriva (sistema de coleta de dados lagrangeano) constituem uma rede de derivadores rastreados por satélite, que deverão cobrir grande parte do Atlântico Sul e Tropical. Parâmetros coletados: temperatura da superfície do mar, corrente superficial, pressão atmosférica e vento na superfície do mar. As boias de fundeio (sistema de coleta de dados eulereano) formam uma rede de boias de fundeio fixas rastreadas por satélite, que deverão cobrir grande parte do Atlântico Sul e Tropical, com o objetivo de monitorar fenômenos atmosféricos, tais como linhas de instabilidade, ciclones tropicais, ondas de Leste, zonas frontais, ciclones extratropicais, além de dados oceanográficos sobre correntes, ondas de Kelvin e Rossby equatoriais e distribuição de temperatura e salinidade. Parâmetros obtidos pelos sensores das boias: temperatura da superfície do mar, corrente superficial, pressão atmosférica, direção e intensidade do vento de superfície, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, perfil vertical de temperatura do mar, condutividade (salinidade) e direção, altura e período das ondas.

A obtenção de dados através do programa implica no aperfeiçoamento dos serviços de meteorologia e oceanografia do Brasil, beneficiando diretamente os seguintes setores: defesa civil; agricultura; zona costeira; recursos vivos; validação de dados de satélites; atividades da indústria do petróleo e de meio ambiente; instalações offshore; portos e estruturas costeiras; transportes marítimos; segurança da navegação e salvaguarda da vida humana no mar. O programa contribui diretamente para as seguintes atividades: Descrever e entender a variabilidade e previsibilidade do sistema climático em diferentes escalas espaço-temporais; Fornecer dados para a previsão numérica de tempo e clima; Descrever e prever as condições de meteorologia marinha e da superfície do oceano de forma que qualquer operação no mar possa ser eficiente e segura; Detectar e avaliar a importância dos efeitos das mudanças climáticas nas condições oceânicas; Fornecer dados para preservar e restabelecer ecossistemas, costeiros e marinhos e para programas de gerenciamento costeiro; gerenciar os recursos marinhos para o uso sustentável; e Melhorar a previsão e a pronta resposta a catástrofes naturais, decorrentes de

fenômenos meteorológicos marinhos extremos.

Em agosto de 2000 ocorreu o lançamento da primeira boia do PNBOIA, na costa do Rio Grande do Sul, em 2009, com a aquisição de mais 4 boias, ocorreu a expansão da rede para toda região Sul/Sudeste, com lançamentos em Santa Catarina, Santos e Cabo Frio. A expansão da rede para região nordeste ocorreu em 2012 com a aquisição de mais 3 novas boias e com lançamentos na Bahia e Pernambuco. Até o ano de 2016 mais 3 boias foram lançadas e o PNBOIA atingiu seu recorde operacional com 9 boias em operação simultânea ao longo da costa brasileira.

## 1.4 Fluxos de calor

Os oceanos têm um impacto significativo no clima e no tempo, aquecendo e resfriando a atmosfera inferior. Quando a água do mar evapora, a superfície oceânica se resfria; posteriormente, quando essa umidade condensa em gotículas de nuvem, o calor é liberado, aquecendo a atmosfera. Essa interação entre umidificação e aquecimento torna o ar mais leve, impulsionando a convecção atmosférica, que por sua vez influencia padrões de vento, convergência de ventos na superfície e divergência nas camadas superiores da atmosfera.

Deste modo, a variação nos padrões de fluxo de calor superficial também impacta a circulação atmosférica. Para previsões meteorológicas e climáticas, é crucial entender e quantificar essas trocas de calor e impulso entre o oceano e a atmosfera, o que pode ser desafiador devido às dinâmicas complexas envolvidas e à variabilidade temporal e espacial dos fluxos. (CRONIN, *et al.*, 2019)

Essas trocas intensas de calor entre o ar e o mar possuem um papel fundamental em diversas escalas temporais e espaciais, influenciando tanto o tempo, quanto previsões climáticas de longo prazo. Compreender essas trocas é vital para prever eventos climáticos, como o El Niño, e é essencial para gerenciar recursos naturais e reduzir riscos para populações vulneráveis. No entanto, a medição precisa dessas trocas é complexa. (CRONIN, *et al.*, 2019).

O fluxo de calor líquido na superfície ( $Q_{net}$ ) compreende os fluxos de ondas curtas, radiação solar ( $Q_{SW}$ ); os fluxos de ondas Longas, subdivididos em radiação termal ( $Q_{LW}$ ); e os fluxos de calor latente ( $Q_{lat}$ ) e sensível ( $Q_{sen}$ ):

O fluxo de calor latente na superfície,  $Q_{lat}$ , é o calor extraído do oceano quando a água do mar evapora. Esse calor é liberado para a atmosfera quando e onde o vapor condensa, formando nuvens. Da mesma forma, o fluxo de calor sensível,  $Q_{sen}$ , é o calor extraído do oceano associado a uma diferença de temperatura ar-mar (CRONIN, *et al.*, 2019). Ao longo deste

trabalho o sinal convencionado para os fluxos de calor latente e calor sensível quando negativo indicam a transferência de calor do oceano para a atmosfera, e quando positivo a transferência de calor ocorre da atmosfera para o oceano. Durante um ano completo, é esperado um equilíbrio próximo entre o aquecimento radiativo solar do oceano (reduzido pela perda líquida de calor radiativo de ondas curtas), a perda de calor latente devido à evaporação e a perda de calor sensível induzida por diferenças de temperatura e umidade ar-mar. (CRONIN, *et al.*, 2019).

## 2 Objetivos

A borda da PCSE é uma importante região da BS, tanto pela presença da CB escoando para S/SW e transportando calor para as altas latitudes, quanto pelas variações temporais das propriedades meteoceanográficas. Nessa região também ocorre a interação entre a dinâmica oceânica e a dinâmica de plataforma continental.

Sendo assim, diante do que foi exposto sobre as variações temporais na BS da TSM, da temperatura do ar, da umidade relativa, da pressão atmosférica ao nível do mar, da intensidade e direção do vento, torna-se necessário caracterizar com os dados de boia os ciclos diurnos e sazonais dessas propriedades.

Tendo em vista também o impacto das frentes frias em escala sinótica (2 a 10 dias) sobre essas variáveis e conseqüentemente sobre os fluxos de calor e de momento, é necessário então uma melhor compreensão desse impacto, caracterizando também o ciclo sinótico das variáveis meteoceanográficas.

Uma vez que os dados do ERA5 vêm sendo validados por dados de boia, conforme realizado por Dereczynski, et al. (2022), proporcionando um conhecimento climatológico da BS, então é conveniente também comparar fluxos de calor calculados a partir das séries temporais dos dados da boia com os fluxos de calor oriundos do ERA5.

Em conformidade com os objetivos do PNBOIA, esse trabalho tem por objetivo geral investigar a variabilidade diária, sinótica e sazonal da borda da plataforma continental em frente a Santos, a partir dos dados de uma boia do projeto PNBOIA. Para tal, foram estabelecidos os objetivos específicos:

- I). Caracterizar os ciclos diurnos e sazonais da TSM, temperatura do ar, pressão atmosférica ao nível do mar, umidade relativa, intensidade e direção do vento;
- II). Calcular os fluxos de calor com fórmulas *bulk*;
- III). Explicar o impacto da passagem das frentes frias sobre a TSM, temperatura do ar, pressão atmosférica ao nível do mar, umidade relativa, intensidade e direção do vento, fluxos de calor: variância, periodicidade e amplitude.
- IV). Realizar a análise espectral das séries temporais da TSM, temperatura do ar, pressão atmosférica ao nível do mar e magnitude do vento, a fim de identificar a contribuição energética das bandas diurnas, sinótica e sazonal; e

V). Comparar os fluxos de calor calculados com as fórmulas *bulk* com os fluxos de calor obtidos com o ERA5.

## 3 Dados e Métodos

### 3.1 Dados

Foram analisados os dados de Temperatura superficial do mar( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura do ar( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa(%), pressão atmosférica ao nível do mar(hPa), intensidade(m/s) e direção do vento( $^{\circ}$ ), medidos com a boia meteoceanográfica de Santos, localizada na Latitude  $25^{\circ} 26' 22.2''$  S e Longitude  $45^{\circ} 2' 9.96''$  W (Figura 3.1), sobre a isóbata de 200 metros. A série temporal utilizada compreendeu o período de 21/06/2011 a 20/06/2012, iniciando no primeiro dia do inverno de 2011 e encerrando no último dia do outono de 2012. A boia meteoceanográfica de Santos foi fabricada pela Axys Technologis Inc., modelo 3-Meters (3M), tendo um peso de 1500kg e uma altura de 3,4 m. Para obtenção dos dados meteorológicos esta boia possui como principais sensores um Barômetro, aproximadamente ao nível médio do mar, medindo dados de pressão atmosférica em hPa; dois Anemômetros mecânicos, um a 4,7m e outro a 3,7 metros da superfície do mar, que indicam a direção do vento em graus relativa ao norte magnético, e a velocidade do vento em metros por segundo, calculada com um período de amostragem de 10 minutos; e um sensor de temperatura da superfície do mar interno a um *Acoustic Doppler Profiler* (ADP), este sensor está 0,5 metro abaixo da linha da água (CHM, 2018).

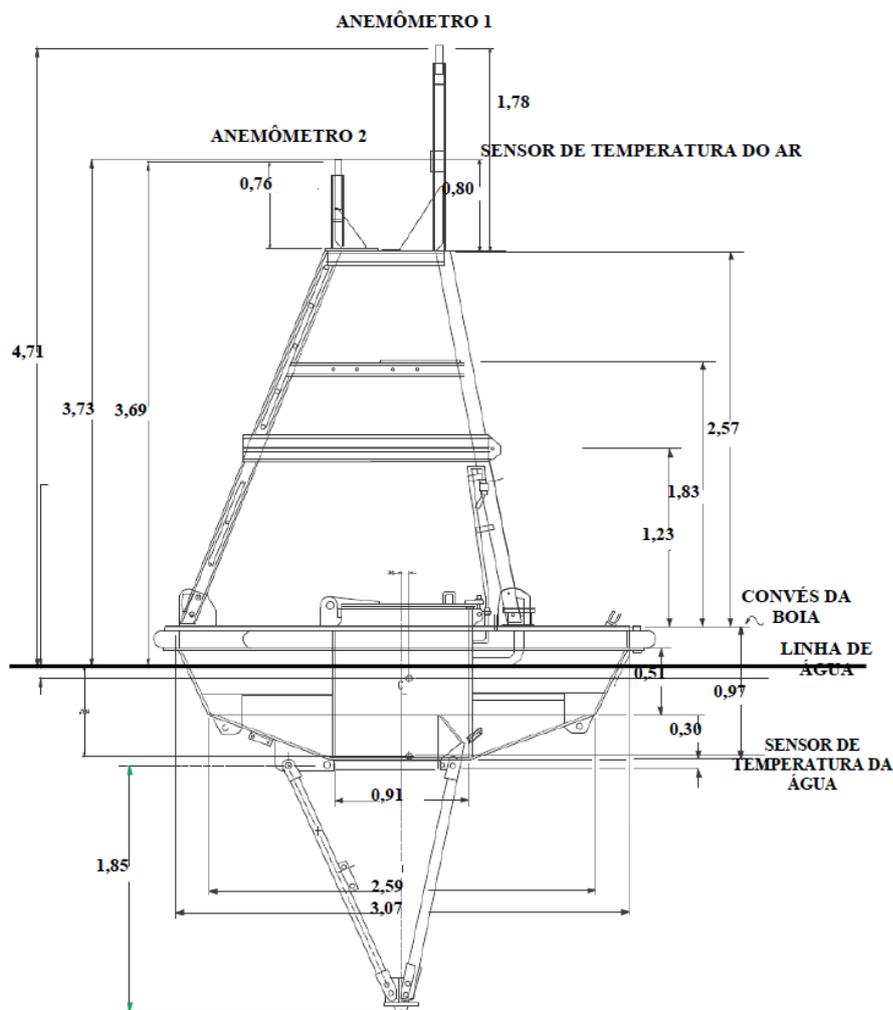
Figura 3.1 - Bacia de Santos e Plataforma Continental Sudeste (PCSE)



Fonte: Autor

Além destes sensores há também um higrótermógrafo, que fica a 3,8m da linha de água (Figura 3.2), e que mede a umidade relativa em conjunto com a temperatura do ar (CHM, 2018).

Figura 3.2 - Desenho esquemático da boia de Santos



Fonte: Extraído de CHM, 2018

### 3.1.1 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5 (ERA5)

ERA5, ou "Fifth Generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Atmospheric Reanalysis of the Global Climate," é um conjunto de dados produzido pelo ECMWF que fornece informações detalhadas sobre o clima global ao longo de várias décadas. O objetivo principal do ERA5 é reconstruir as condições atmosféricas passadas e atuais com alta resolução (HERSBACH, *et al.*, 2020).

Os dados de reanálise do ERA5 são conjuntos de parâmetros atmosféricos e ambientais que resultam da interpolação de dados de observações meteorológicas combinados com previsões meteorológicas de curto prazo para fornecer uma visão abrangente das condições

climáticas passadas e atuais. Estes dados são obtidos pela assimilação de dados meteorológicos observados por estações terrestres, boias oceânicas, satélites e outros instrumentos, junto com as previsões geradas por modelos matemáticos que representam a atmosfera, criando uma estimativa das condições atmosféricas para um determinado momento. Em seguida, sucessivas análises são combinadas, resultando em um conjunto coerente de dados de variáveis atmosféricas, de várias décadas, que representam uma síntese do clima e do tempo passados (HERSBACH, *et al.*, 2020).

Este conjunto de dados utiliza um processo de assimilação de dados para combinar as observações disponíveis com um modelo numérico de previsão do tempo. Isso permite produzir estimativas das condições atmosféricas em diferentes regiões e escalas de tempo. A grade horizontal de dados em resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  para dados de variáveis atmosféricas. Os dados do ERA5 possuem uma resolução temporal de 1 hora, disponibilizando dados de variáveis atmosféricas a cada hora. (HERSBACH, *et al.*, 2020)

Uma ampla gama de variáveis climáticas faz parte do conjunto de dados, incluindo temperatura do ar, temperatura superficial do mar, umidade relativa, componentes zonal e meridional do vento, pressão atmosférica, fluxos de calor latente e calor sensível, entre outras. (HERSBACH, *et al.*, 2020)

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Controle da Qualidade de Dados

Antes de analisar as séries temperais de dados adquiridos pela boia é necessário verificar a qualidade desses dados. O objetivo do controle de qualidade de dados é assegurar a consistência dos dados em um conjunto de dados, e garantir que a qualidade e os erros dos dados sejam perceptíveis ao usuário, através dos sinalizadores de qualidade de dados, ou *Flags* (UNESCO, 2013). Para tal fim este trabalho seguiu os manuais *Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data* (QARTOD) elaborado pelo *Integrated Ocean Observing System* (IOOS), que tem por finalidade identificar a qualidade dos dados oceanográficos pelo uso dos *Flags* (IOOS, 2022). Cabe ressaltar que estes também são os métodos utilizados pelo do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) em seu controle de qualidade (CHM, 2019). Os métodos de qualificação utilizados realizam comparações entre as medições dos sensores, com os limites do equipamento, limites climatológicos e análises estatísticas. Uma vez que os valores medidos não estejam de acordo com o padrão, ou excedam os limites, eles são marcados com um *Soft*

*Flag*, indicando que sua qualidade é questionável; ou com um *Hard flag*, quando não houver dúvida de sua má qualidade. Caso o dado esteja de acordo com todos os padrões estabelecidos e passe nos testes de qualidade ele receberá um *flag 0* (CHM, 2019).

O controle de qualidade QUARTOD teve seu surgimento no contexto do aumento do uso de sistemas de observações oceanográficas e meteorológicas em tempo real, que tem proporcionado uma quantidade cada vez maior de dados. Essa crescente quantidade de informações requeridas por pesquisadores, gestores e pelo público em geral, trouxe a necessidade de garantir a confiabilidade e a qualidade desses dados (IOOS, 2022). Este método foi desenvolvido para suprir essa necessidade e garantir que os dados coletados em sistemas de observação em tempo real sejam precisos, confiáveis e consistentes. Ele é especialmente importante em contextos científicos, onde a qualidade dos dados é fundamental para estudos climáticos, oceanográficos, previsões meteorológicas e estudos sobre o meio ambiente marinho. (IOOS, 2022).

Neste trabalho foram aplicadas as rotinas de testes de controle de qualidade nos dados adquiridos pela Boia Meteoceanográfica de Santos conforme os critérios do QARTOD (PEREIRA, 2015). Os testes foram implementados de acordo com a sequência apresentada no quadro 1.

Quadro 1-Testes de Controle de Qualidade

ORDEM	TESTE
1	Localização
2	Lacunas( <i>gap</i> )
3	Sucessivos iguais ou nulos
4	<i>Spike</i>
5	Varição instrumental
6	Gradiente temporal
7	Exceções

Fonte: Autor

A descrição dos testes está enumerada a seguir:

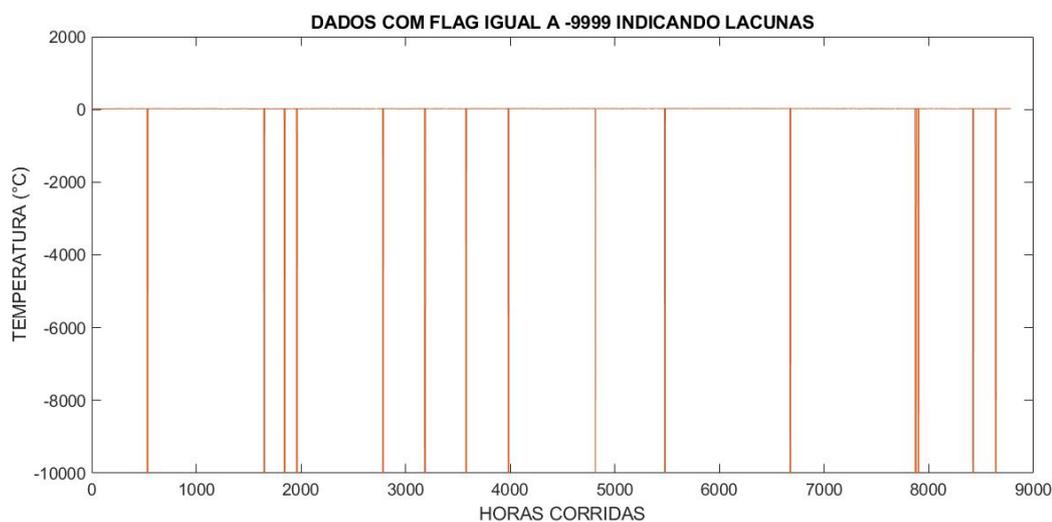
1) Verificação da localização(latitude/longitude) atribuída aos dados obtidos estavam de acordo com os valores esperados para a localização da boia. Todos os valores de localização estavam de acordo com a expectativa(25,28°S/44,92°W).

2) Verificação da Ocorrência de dados inexistentes. Os dados inexistentes são marcados pelo CHM com -9999 (Figura 3.3). Esta verificação foi fundamental para escolha do período

de análise, uma vez que é interessante obter o período com o menor número possível de dados ausentes. As lacunas de dados foram preenchidas dos seguintes modos:

- i) Substituição da lacuna pela média entre seu antecessor e seu sucessor.
- ii) Interpolação linear entre os dados, no caso da mais de um dado ausente seguido.

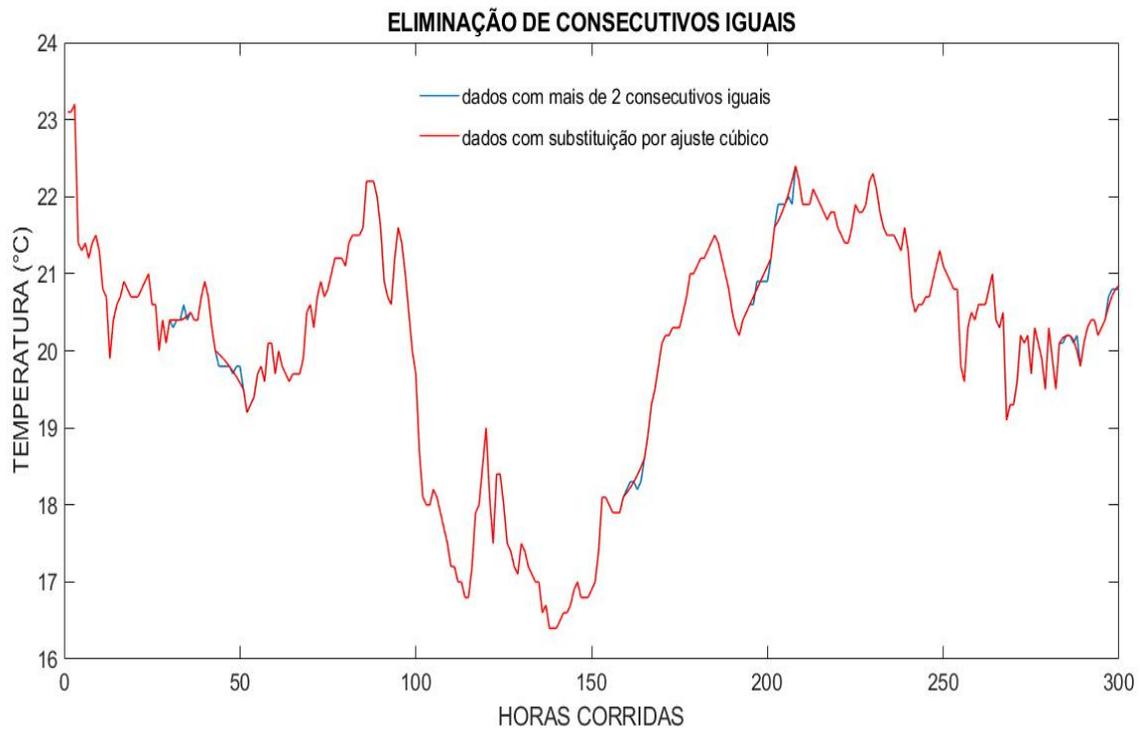
Figura 3.3 - Dados brutos com flag de ausência



Fonte: Autor

3) Verificação de dados repetidos: que verificou se há variação dos valores medidos ao longo do tempo, durante este teste foi verificado se os sensores estão apresentando dados repetidos ao longo de um período igual ou maior a 3 horas (IOOS, 2021), ou seja, se houve uma variação nos valores dos dados entre as amostragens no período estabelecido. Os dados repetidos foram substituídos usando os mesmos métodos descritos no teste 2 (Figura 3.4).

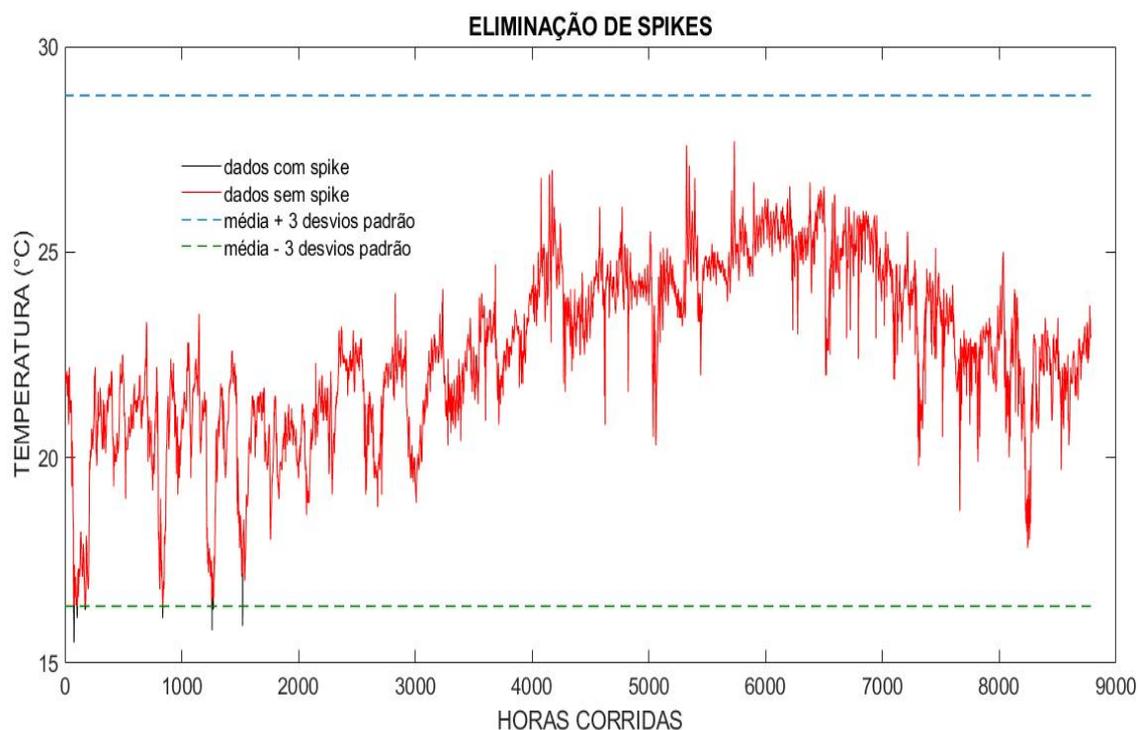
Figura 3.4 – Eliminação de dados consecutivos



Fonte: Autor

4) Verificação de ocorrência de *spikes*: para tal, foram determinadas a média e o desvio padrão para cada série de dados. Os valores que estiveram mais de 3 desvios padrão acima da média (limite máximo), ou 3 desvios padrão abaixo da média (limite mínimo) foram considerados *spikes* (Figura 3.5) e posteriormente substituídos pelo valor médio entre seu sucessor e seu antecessor. Este teste foi realizado mais de uma vez, em diferentes etapas do controle de qualidade, dado que após a substituição de qualquer dado espúrio se faz necessário uma nova análise estatística sobre os dados para se obter novamente os valores de limite máximo e mínimo.

Figura 3.5 - Eliminação de Spikes



Fonte: Autor

5) Verificação de Variação Instrumental (*Range Check*): Avaliação dos Limites de aquisição dos sensores, na qual é verificada se existem dados espúrios fora dos limites máximos e mínimos definidos pelo fabricante do sensor, conforme apresentado na Quadro 2 (CHM, 2019). Neste teste não foram encontrados dados fora dos limites definidos pelo fabricante.

Quadro 2 - Limites de aquisição pré-definidos pelos fabricantes dos sensores

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
Velocidade do Vento (m/s)	0	59
Direção do Vento (°)	0	360
Temperatura do Ar (°C)	-39	59
Pressão Atmosférica (dbar)	501	1099
Temperatura da Superfície do Mar (°C)	-3	29
Umidade Relativa do ar (%)	25	102

Fonte: Extraído de CHM, 2019

6) Verificação do Gradiente temporal dos dados: Para verificar variações temporais típicas de cada parâmetro estudado, foi aproximada a primeira derivada com relação ao tempo com

intervalo (*lag*) de uma hora entre as medições, e verificados os valores extremos da distribuição desses dados. A Quadro 3 apresenta os valores sugeridos para cada variável por Pereira (2015) para a boia de Rio Grande do PNBOIA. Estes limites classificam o dado como suspeito.

Quadro 3 - Valores máximos de desvio aceitáveis

Parâmetro	Valor máximo aceitável
Velocidade do Vento (m/s)	5 (m/s) /h
Pressão Atmosférica (hPa)	6,0 hPa/h
Temperatura do Ar (°C)	3,0 °C/h
Temperatura da Água(°C)	3,0 °C/h

Fonte: Extraído de PEREIRA, 2019

7) Verificação das exceções pelos sistemas frontais: este teste verificou os dados medidos durante a atuação de um sistema frontal, que pode gerar valores acentuados ou extremos das variáveis meteorológicas se comparados a uma situação de bom tempo. Deste modo, os dados observados podem ser falsamente identificados como dados espúrios ou *spikes*, sendo substituídos em um dos testes anteriores. Por isso, fez-se necessário a realização deste teste para preservar os dados observados durante a ação de sistemas frontais. Neste teste foram observados os sistemas frontais que aturam sobre a localização da boia ao longo do período estudado. Os dados de temperatura do ar, intensidade do vento e pressão atmosférica que foram removidos nos testes de gradiente temporal e Spikes, mas ocorreram logo após a passagem de um sistema frontal, foram definidos como exceções e não foram substituídos.

### 3.2.2 Análise Estatística

A fim de compreender o conjunto de dados utilizados neste trabalho e transformá-los em informações, foram aplicadas ferramentas estatísticas como o cálculo de médias, desvio padrão, variância, correlação, gráficos de histograma e gráficos de distribuição normal (BUSSAB e MORETTIN, 2010).

A média é uma medida de tendência central que representa o valor médio dos dados na amostra. É calculada somando todos os valores e dividindo pelo número de elementos na amostra ( $n$ ).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

(1)

O desvio padrão( $\sigma$ ) e a variância( $var$ ) medem a dispersão dos dados em relação à média, sendo a variância o quadrado do desvio padrão. Quanto maior o desvio padrão/variância, maior a dispersão dos dados. Costuma-se usar o desvio padrão para compreender a dispersão dos dados, uma vez que a variância pode causar problemas de interpretação por sua medida de dimensão ser igual ao quadrado da dimensão dos dados (BUSSAB e MORETTIN, 2010). Onde  $x$  é o valor da variável questão,  $\bar{x}$  é a média dos valores de  $x$ , e  $n$  é o número de variáveis  $x$ .

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n} \quad (2)$$

$$\sigma(X) = \sqrt{var(X)} \quad (3)$$

A correlação de Pearson ou coeficiente de associação mede a relação linear entre duas variáveis, ou seja, são medidas que representam o grau de associação ou dependência entre duas variáveis  $X$  e  $Y$ . Varia entre -1 (correlação negativa perfeita) e +1 (correlação positiva perfeita). Correlação próxima a 0 indica pouca ou nenhuma relação (BUSSAB e MORETTIN, 2010).

$$Corr(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma(X) \times \sigma(Y)} \quad (4)$$

O Erro médio (EM) ou ainda tendência ou viés (*bias*) é uma medida do erro sistemático de um modelo numérico, ou seja, uma tendência de o modelo superestimar ou subestimar o valor real daquele dado (SAKAGAMI, 2010). O *bias* é resultado da média das diferenças entre valor previsto ( $P_i$ ) e o valor observado ( $O_i$ ).

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (5)$$

O erro médio quadrático (EMQ), ou *mean squared error* (MSE), é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar a qualidade de um modelo estatístico ou algoritmo de previsão. Ele representa a média dos quadrados dos erros entre os valores previstos pelo modelo e os valores reais observados nos dados. O EMQ é usado para medir o quão bem o modelo se ajusta aos dados.

$$EMQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6)$$

Onde  $n$  é o número total de observações,  $y_i$  a  $i$ -ésima observação, e  $\hat{y}_i$  o valor previsto pelo modelo. A partir da média dessas diferenças ao quadrado, calcula-se a raiz quadrada para obter a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{EQM} \quad (7)$$

O RMSE é uma métrica útil para quantificar a precisão média do modelo em relação aos valores observados. Quanto menor o RMSE mais o modelo está ajustado aos dados observados, indicando menos erros por parte do modelo (FERNANDEZ, 2017).

O histograma mostra a distribuição dos dados em intervalos, chamados de classes, em função do número de dados observados ( $n$ ), sendo a área de cada retângulo proporcional a frequência dos dados dentro daquela classe. O número de classes ( $K$ ) é importante para revelar padrões na distribuição dos dados, e é determinado pela regra de Sturges (BUSSAB e MORETTIN, 2010).

$$K = 1 + 3,31 \times \text{Log}(n) \quad (8)$$

A curva normal (ou gaussiana) é uma distribuição de probabilidade caracterizada por uma forma de sino. A distribuição normal é determinada de acordo com os parâmetros de valor esperado ( $\mu$ ) e variância ( $\sigma^2$ ) da variável aleatória  $X$  (BUSSAB e MORETTIN, 2010).

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, -\infty < X < \infty \quad (9)$$

A análise da distribuição dos dados em relação à curva normal pode indicar se os dados seguem um padrão.

A aplicação desses métodos estatísticos possibilita realizar uma análise abrangente, identificar tendências, relações e padrões presentes nos dados. Essas ferramentas proporcionam uma base sólida para a compreensão de fenômenos complexos a partir dos conjuntos de dados (BUSSAB e MORETTIN, 2010).

A Anomalia refere-se a diferença de um dado em relação a um padrão ou a média dos dados. A anomalia de um conjunto de dados em torno de um valor médio, é definida pela fórmula a seguir:

$$A = x_i - \bar{x}$$

Onde  $x_i$  é o valor do dado a ser analisado, e  $\bar{x}$  é a média do conjunto de dados.

O coeficiente de assimetria ( $A_s$ ) é uma medida que indica o grau de assimetria de uma distribuição em torno de sua média. Valores positivos indicam a assimetria à direita, e valores negativos indicam a assimetria à esquerda (CRAMÉR, 1946). O coeficiente de assimetria usado neste trabalho é determinado por:

$$\alpha = \frac{n}{(n-1).(n-2)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \bar{y}}{s} \right)^3 \quad (10)$$

### 3.2.3 Análise Espectral

No presente trabalho estão apresentados os espectros de os quais foram obtidos com base na análise de Fourier. Por isso, será apresentado em seguida uma breve descrição da análise de Fourier de séries discretas.

Uma função que é desenvolvida em Série de Fourier pode ser representada como:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{n/2} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (11)$$

Os coeficientes  $a_n$  e  $b_n$  são calculados pela análise dos  $n$  valores amostrados em intervalos de tempo constante  $\Delta t = 1 \text{ hora}$ .  $\omega_n$  é a frequência angular do  $n$ -ésimo harmônico, sendo dada por:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{N\Delta t} \quad (12)$$

Em que  $N\Delta t$  representa todo o período da série temporal. Dado que o maior harmônico possível de se obter nas séries de Fourier é  $n=N/2$ , temos então que a frequência mais alta, ou frequência de corte, chamada também de frequência de Nyquist (FRANCO, 2009) das séries é igual a:

$$\omega_c = \frac{\pi}{\Delta t} \quad (13)$$

A menor frequência ( $n=1$ ), também chamada de frequência fundamental é dada por:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{N\Delta t} \quad (14)$$

Portanto é possível observar que todas as frequências representadas pela série de Fourier são múltiplas da frequência fundamental, e que a frequência fundamental depende diretamente do período de amostragem e do número de amostras observadas. Quanto maior o número de observações maior será o número de harmônicos, resultando em uma maior resolução espectral do período observado.

Tendo em vista que a frequência de corte depende exclusivamente do intervalo de amostragem ela indicará o harmônico de maior frequência, ou de menor período.

Neste trabalho a taxa de amostragem dos dados foi de uma em uma hora, e o período total de amostragem foi de um ano, portanto foram observados um total de 8760 dados para cada variável meteorológica, sendo obtidas 4380 frequências na análise de Fourier. Então temos que a frequência fundamental  $\omega_1 = 1,99 \times 10^{-7}$ , e a frequência de corte é  $\omega_c = 8,72 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ .

O espectro de amplitudes foi obtido, utilizando rotinas de código no *software matlab*, plotando as frequências de Fourier no eixo das abscissas contra as suas respectivas amplitudes no eixo das ordenadas.

Com base no trabalho de M. FILHO (2017), a investigação das principais forçantes que modificam as propriedades meteoceanográficas, foi realizada nas seguintes bandas de frequências: banda semidiurna: compreendem as frequências, em ciclos por dia (cpd) no intervalo [1,12], correspondendo a períodos entre 2 h e 24 h (1d); banda sinótica ]1,0,03] correspondendo a períodos entre 1 d e 30 d; banda de intrasazona [0,011, 0,03[, compreendendo períodos entre 30 e 90 dias; e banda sazonal: [0,00273, 0,011[, compreendendo períodos entre 90 d e 365 d.

### 3.2.4 Transformada Inversa de Fourier

A Transformada de Fourier é uma extensão da série de Fourier que permite analisar funções não periódicas. Ela transforma uma função do domínio do tempo em uma função no domínio da frequência. Isso é extremamente útil para analisar a composição de frequências em um sinal e encontrar informações sobre seu conteúdo espectral. A discretização de funções é importante em muitas aplicações, especialmente naquelas que envolvem processamento digital (PUPIN, 2011). A transformada de Fourier  $F(\omega)$  da função real  $f(t)$  é definida como:

$$F(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (15)$$

Onde  $\omega$  representa a frequência angular correspondente. Deste modo, a transformada de Fourier fornece informações importantes sobre as diferentes frequências que compõem a função original.

A transformada inversa de Fourier é a operação inversa, que permite retornar do domínio da frequência para o domínio do tempo, definida como:

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}\{F(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{-i\omega t} dt \quad (16)$$

Logo, estas ferramentas matemáticas possibilitam a análise de sinais, do seu espectro de frequência, harmônicos e suas amplitudes e a reconstrução do sinal em função das frequências de interesse (PUPIN, 2011).

A transformada inversa de Fourier também foi aplicada neste trabalho, por meio de códigos de *matlab*, para fazer a reconstituição do sinal para cada uma das bandas de frequência analisadas: diurna, sinótica, intrasazonal e sazonal. Isso permite estudar a variância de cada uma

das bandas de acordo com os fenômenos meteoceanográficos que ocorrem na Baía de Santos.

### 3.2.5 Cálculo dos Fluxos de Calor

O balanço de calor na superfície do oceano considera os seguintes fluxos de calor de acordo com Pickard (1990), com valores positivos e negativos representando ganho e perda de calor respectivamente:

$Q_c$  é fluxo de calor devido à radiação solar incidente em ondas curtas, sendo um termo positivo;  $Q_b$  é a diferença entre a energia emitida pelo oceano e a emitida pela atmosfera em ondas longas, sendo geralmente negativo;  $Q_s$  é o fluxo de calor sensível, podendo ser positivo ou negativo conforme a TSM seja respectivamente menor ou maior do que a temperatura do ar;  $Q_l$  é o fluxo de calor latente, podendo também ser positivo ou negativo conforme a umidade imediatamente acima do nível do mar seja respectivamente menor ou maior que a umidade a uma altitude específica (2 m);  $Q_a$  é o fluxo advectivo de calor devido às correntes marinhas. Fluxo de calor latente quanto o fluxo de calor sensível são componentes turbulentas do balanço de calor da superfície.

$$Q_{net} = Q_c + Q_b + Q_s + Q_l + Q_a \quad (17)$$

Neste trabalho foram calculados os fluxos de calor sensível e de calor latente. O fluxo de calor sensível ( $Q_s$ ) é obtido pela diferença de temperatura entre a superfície do mar e a atmosfera com o calor fluindo do oceano para a atmosfera, e sua parametrização é dada por:

$$Q_s = -\rho_{air} C_p C_h u (T_s - T_a) \quad (18)$$

onde  $\rho_{air}$  é a densidade do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar,  $C_h$  é o coeficiente de transferência de calor sensível,  $u$  é a velocidade do vento a 10 metros de altura,  $T_s$  é a temperatura da superfície do mar e  $T_a$  é a temperatura potencial do ar a 2 metros de altura.

O fluxo de calor latente ( $Q_l$ ) está associado com as mudanças de fase da água, do estado líquido para o gasoso ou do gasoso para o líquido. A medida em que a água evapora o oceano perde calor para a atmosfera. A parametrização do fluxo de calor latente é dada por:

$$Q_l = -\rho_{air} C_e u (q_s - q_a) L \quad (19)$$

onde  $\rho_{air}$  é a densidade do ar,  $C_e$  é o coeficiente de transferência de calor latente,  $u$  é a velocidade do vento a 10 metros de altura,  $q_s$  é a umidade específica saturada à temperatura da superfície do mar e  $q_a$  é a umidade específica do ar medida a 2 metros de altura.

Para realizar o cálculo dos fluxos de calor latente e sensível foram utilizados os algoritmos COARE (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) de acordo com Fairall 2001. Estes algoritmos são ferramentas essenciais na compreensão da interação entre os oceanos e a atmosfera. Eles são utilizados para estimar a transferência de calor, umidade e momento (momentum) entre a superfície do oceano e a atmosfera. Esses algoritmos desempenham um papel crucial na modelagem climática e previsões meteorológicas, permitindo entender como as trocas de energia e umidade entre os dois sistemas influenciam o clima global. (FAIRALL, *et al.*, 2003)

Os algoritmos COARE foram desenvolvidos para fornecer estimativas mais precisas e detalhadas dos fluxos de calor e outras variáveis associadas à interação ar-mar. O desenvolvimento dos algoritmos COARE começou em 1993, quando Chris Fairall, Frank Bradley e David Rogers iniciaram o desenvolvimento de um algoritmo de cálculo de fluxos de calor a granel para a comunidade COARE. A primeira versão foi lançada em 1993 e passou por várias iterações e melhorias ao longo dos anos. As atualizações incluíram ajustes nos coeficientes de transferência, parametrizações de efeitos como a influência de ondas gravitacionais de superfície nos fluxos, além de considerações de estabilidade atmosférica e outras correções (FAIRALL, *et al.*, 2003).

As variáveis mais importantes de entrada para o algoritmo COARE incluem a velocidade do vento, temperatura de pele da água do mar, temperatura do ar e umidade do ar. Essas propriedades são usadas para calcular os fluxos de calor sensível e latente, que são indicadores cruciais da transferência de energia entre a superfície do oceano e a atmosfera. Cabe ressaltar que a temperatura superficial de pele da água do mar refere-se à temperatura da camada mais fina da superfície do oceano, geralmente na ordem de micrômetros a milímetros de espessura.

Esta camada é onde ocorre a troca direta de calor com a atmosfera, e sua temperatura pode ser ligeiramente diferente da temperatura da água logo abaixo dela, conhecida como temperatura de balde, que é medida até 0,5 metros. Deste modo o algoritmo COARE calcula a TSM de pele a partir da temperatura de balde obtida pelo sensor de temperatura da boia meteocanográfica. Esta correção é fundamental para o correto cálculo dos fluxos de calor sensível. (FAIRALL, *et al.*, 2003)

As versões do algoritmo COARE incluem a 1.0, lançada em 1993, a 2.0 em agosto de 1994, a 2.5b, lançada após modificações feitas em 1995 e 1996, a 2.5b, que foi disponibilizada como um "pacote" consistindo no código-fonte em Fortran e um conjunto de dados de teste, e a versão mais recente e a utilizada neste trabalho é a 3.0. (FAIRALL, *et al.*, 2001).

A versão 3.0 do algoritmo COARE foi baseada em resultados publicados e em uma ampla gama de medições de fluxo, incluindo medições do *Environmental Technology Laboratory* (ETL). Esta versão apresentou várias melhorias, como a redução no número de iterações para solucionar a estabilidade, a redefinição dos coeficientes de transferência escalares e a inclusão de parâmetros relacionados às ondas gravitacionais de superfície (FAIRALL, *et al.*, 2003).

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Estatística e Análise espectral

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos a partir da análise de dados observados das variáveis: TAR2M, a TSM, UR2M e umidade específica a 2 metros (q2M), PNMM, V10M, direção do vento a 10 metros (DIR10M), fluxos de calor sensível (SH) e latente (LH). Por meio deste estudo, são obtidas estatísticas básicas que caracterizam as séries temporais dessas variáveis, permitindo uma compreensão dos padrões climáticos locais. Além disso, uma análise espectral das séries temporais é conduzida, visando revelar padrões cíclicos a partir das frequências dominantes nos dados. Importante destacar que os gráficos resultantes dessas análises estão de acordo com o horário do Meridiano de Greenwich, assegurando uma base para a comparação com outros estudos científicos. Ressalta-se que o fuso horário local, indicado pela letra “P”, está defasado 3 horas mais cedo em relação ao fuso de Greenwich. A importância relativa de cada banda de estudo nas variações das propriedades meteoceanográficas foi calculada e estão apresentadas no Quadro 4. Pode-se ver que, exceto TSM e TAR2M cujas variações sazonais foram predominantes, as demais propriedades foram dominadas pelas variações na escala sinótica. Entre essas, ressalta-se também o fato de V10M ter a escala diurna como a segunda em importância relativa, enquanto as demais tiveram a banda sazonal com essa relevância.

Quadro 4 - Percentuais de contribuição das variâncias de cada banda de frequência, para cada variável meteoceanográfica, em relação a variância total.

	Diurna	Sinótica	Intrasazonal	Sazonal
TAR2M	2,63%	22,37%	3,04%	71,96%
PNMM	2,79%	62,12%	7,34%	27,76%
UR2M	6,30%	72,34%	8,46%	12,91%
TSM	1,58%	7,98%	3,13%	87,30%
q2M	3,95%	60,54%	7,30%	28,20%
LH	6,69%	73,01%	6,04%	14,26%
SH	8,75%	73,35%	6,12%	11,78%
V10M	17,02%	75,04%	2,63%	5,31%

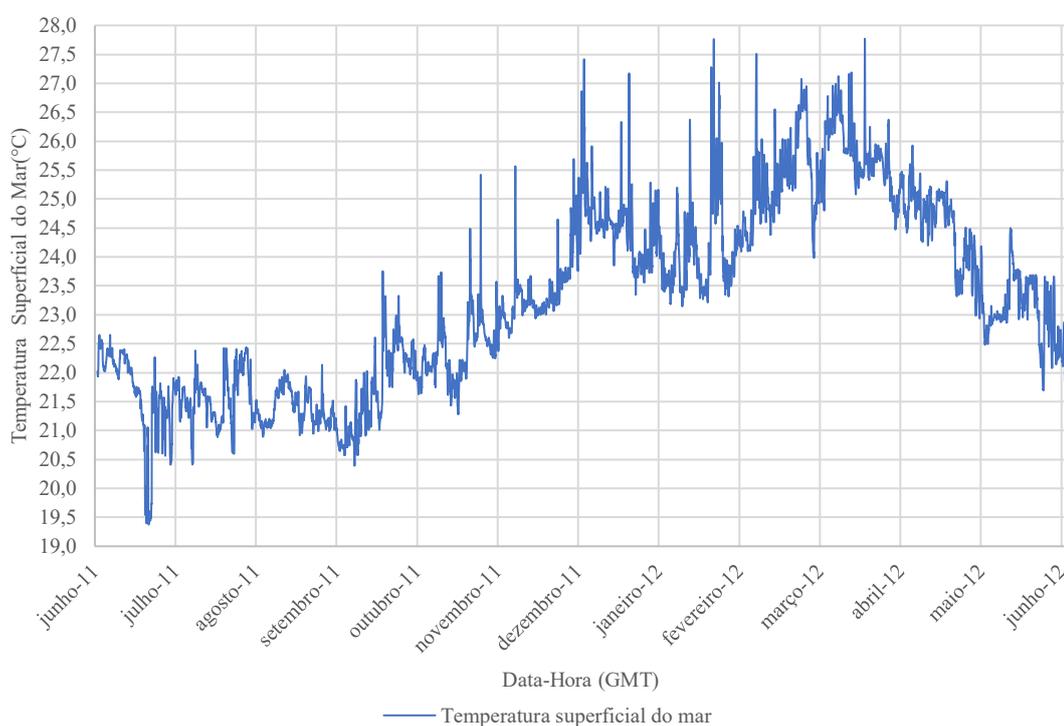
Fonte: Autor

### 4.1.1 TSM

Na série temporal da temperatura da superfície do mar, apresentada na Figura 4.1, é possível observar que os valores da TSM crescem gradualmente desde o inverno de 2011 até o verão/início do outono de 2012, diminuindo em seguida até o final do outono. Tal padrão de variação é tipicamente sazonal.

O valor mínimo da TSM ( $19,6^{\circ}\text{C}$ ) ocorreu em 10/07/2011 as 8h GMT (5h horário local). O valor máximo da TSM ( $28,3^{\circ}\text{C}$ ) foi observado no início do outono, em 05/04/2012 as 18h GMT (15h local). Observa-se variações entre  $1^{\circ}\text{C}$  e  $5^{\circ}\text{C}$ , sobrepondo-se ao sinal sazonal.

Figura 4.1 – Série temporal da temperatura da superfície do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

A média da TSM foi  $23,6^{\circ}\text{C}$ , e mediana  $23,5^{\circ}\text{C}$  (Quadro 5), apresentando uma diferença de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . A moda ( $22,5^{\circ}\text{C}$ ) apresentou diferença superior a  $1^{\circ}\text{C}$  em relação a esses dois parâmetros de medida central, estando a classe dos valores mais frequentes entre  $21,7^{\circ}\text{C}$  e  $22,4^{\circ}\text{C}$ .

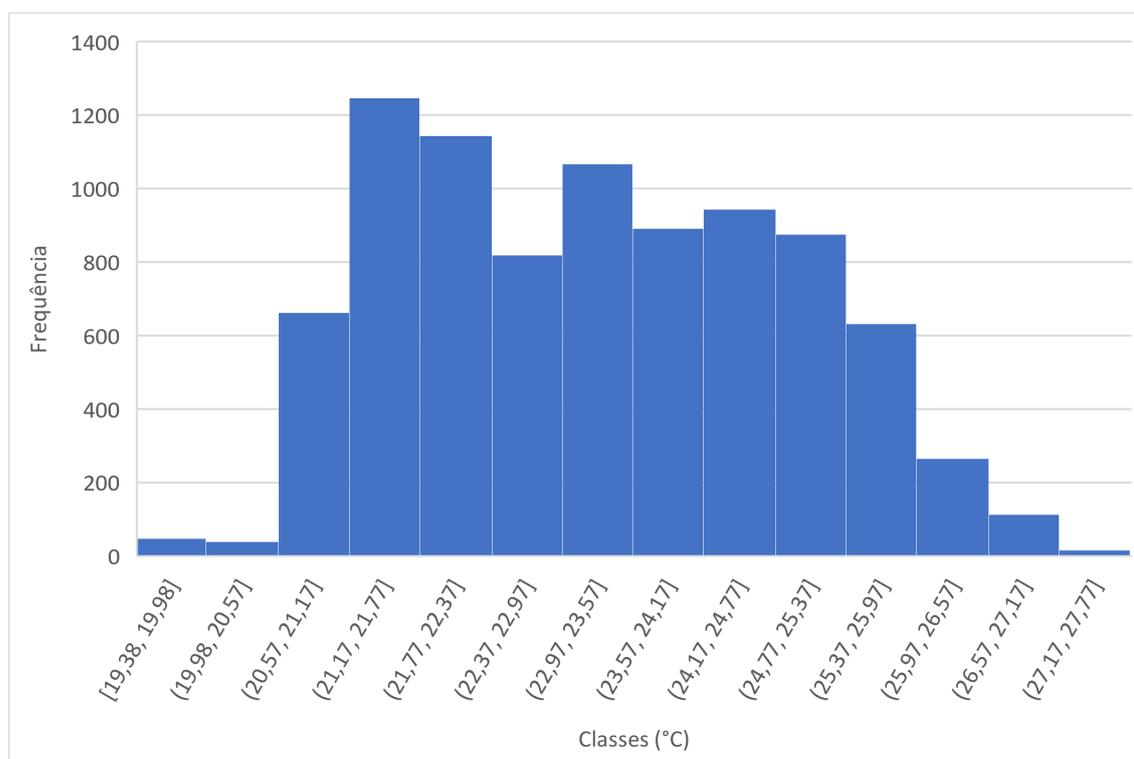
Quadro 5 - Parâmetros Estatísticos da Temperatura Superficial do Mar

TSM	
<b>MÉDIA</b>	23,28°C
<b>MEDIANA</b>	23,19°C
<b>MODA</b>	21,70°C
<b>DESVIO PADRAO</b>	1,61°C
<b>VARIANCIA</b>	2,59°C <sup>2</sup>
<b>ASSIMETRIA</b>	<b>0,20</b>

Fonte: Autor

A ocorrência de uma segunda classe mais frequente, com valores entre 23,0°C e 23,6°C, dá um caráter bimodal para a TSM (Figura 4.2). Pereira (2015), analisando uma série temporal de TSM da boia de Rio Grande do PNBOIA, também identificou um caráter bimodal. A variância da TSM foi 2,61°C<sup>2</sup>, com desvio padrão de 1,62°C, caracterizando pequeno espalhamento em torno da média.

Figura 4.2 - Histograma da Série temporal da temperatura da superfície do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012

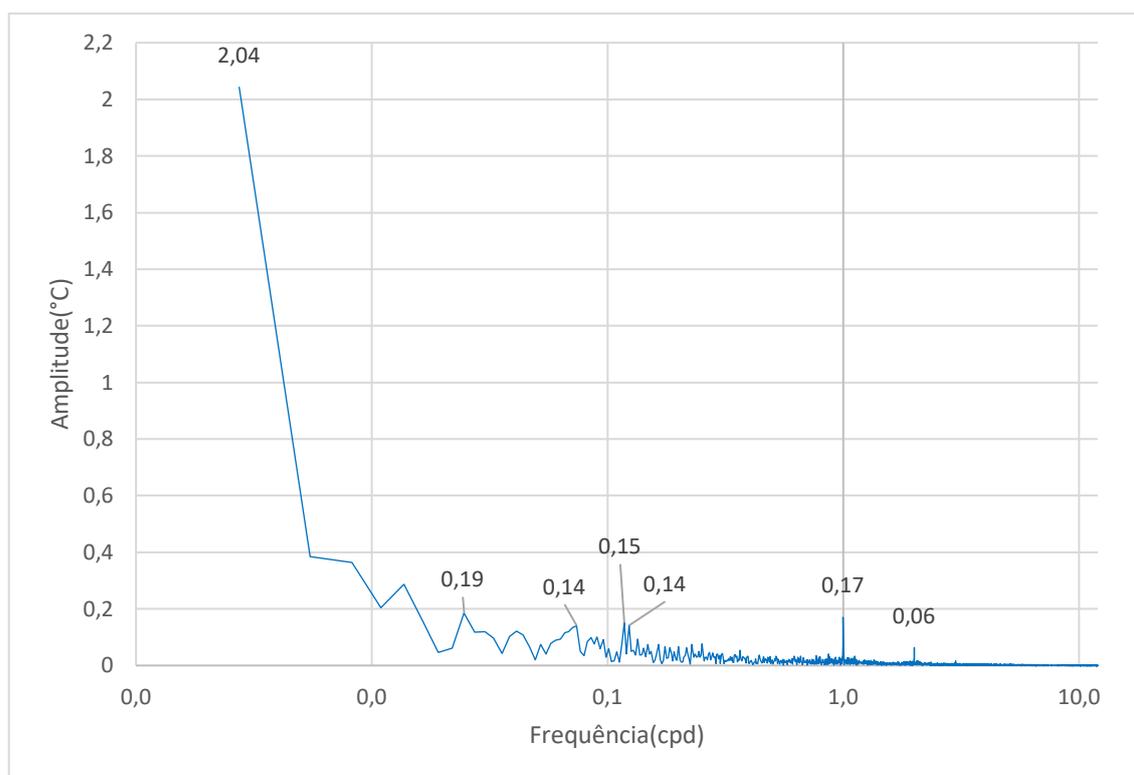


Fonte: Autor

Assim sendo, a TSM apresenta uma distribuição assimétrica positiva (0,68), que está associada com a baixa frequência das altas temperaturas ( $TSM > 27^{\circ}\text{C}$ ) do verão e do início do outono em relação às mais baixas, como pode ser observado no histograma (Figura 4.2).

O espectro de amplitude da TSM, Figura 4.3, apresenta nitidamente a frequência de 1 cpd (24h) com amplitude de  $0,17^{\circ}\text{C}$ , associado com a periodicidade de 24 h das temperaturas máximas diárias. Essa variação diurna é causada pela radiação solar e a rotação da terra (Kawai & Wada, 2007). Ressalta-se, também, uma frequência semidiurna (2 cpd ou 12h) com amplitude de  $0,06^{\circ}\text{C}$ . As menores frequências, próximo a banda sinótica, não apresentam amplitudes maiores que a do ciclo diurno, destacando-se os picos de  $0,15^{\circ}\text{C}$  (8 dias),  $0,14^{\circ}\text{C}$  (8 dias), e  $0,14^{\circ}\text{C}$  (13 dias), com exceção do pico de  $0,19^{\circ}\text{C}$  (40 dias). Sendo a maior amplitude,  $2,04^{\circ}\text{C}$ , a da componente anual, que é a principal forçante da banda sazonal onde nitidamente a energia espectral contrasta com as das demais bandas.

Figura 4.3 - Espectro de amplitude da Série temporal da temperatura da superfície do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012

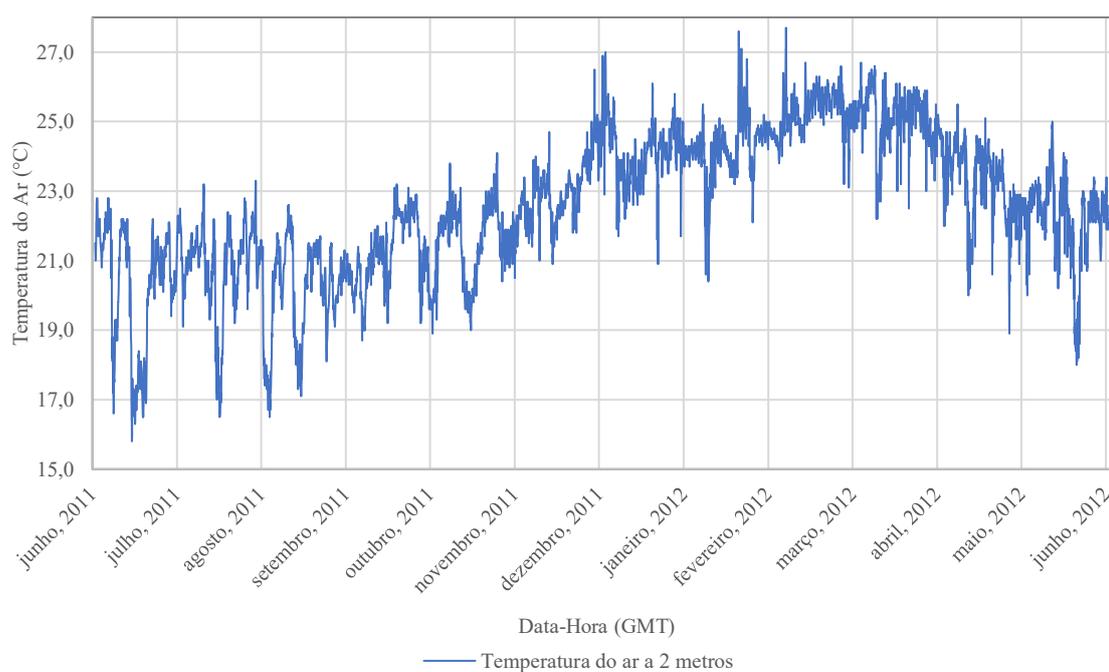


Fonte: Autor

### 4.1.2 TAR2M

Está apresentada na Figura 4.4 a série temporal da temperatura do ar a dois metros. Pode-se observar que os valores crescem gradualmente desde o inverno de 2011 até o verão de 2012, a partir daí diminuem progressivamente até o final do outono de 2012. Sobrepostos a esse padrão sazonal ocorrem também variações de TAR2M que oscilam entre 0,5°C e 6°C.

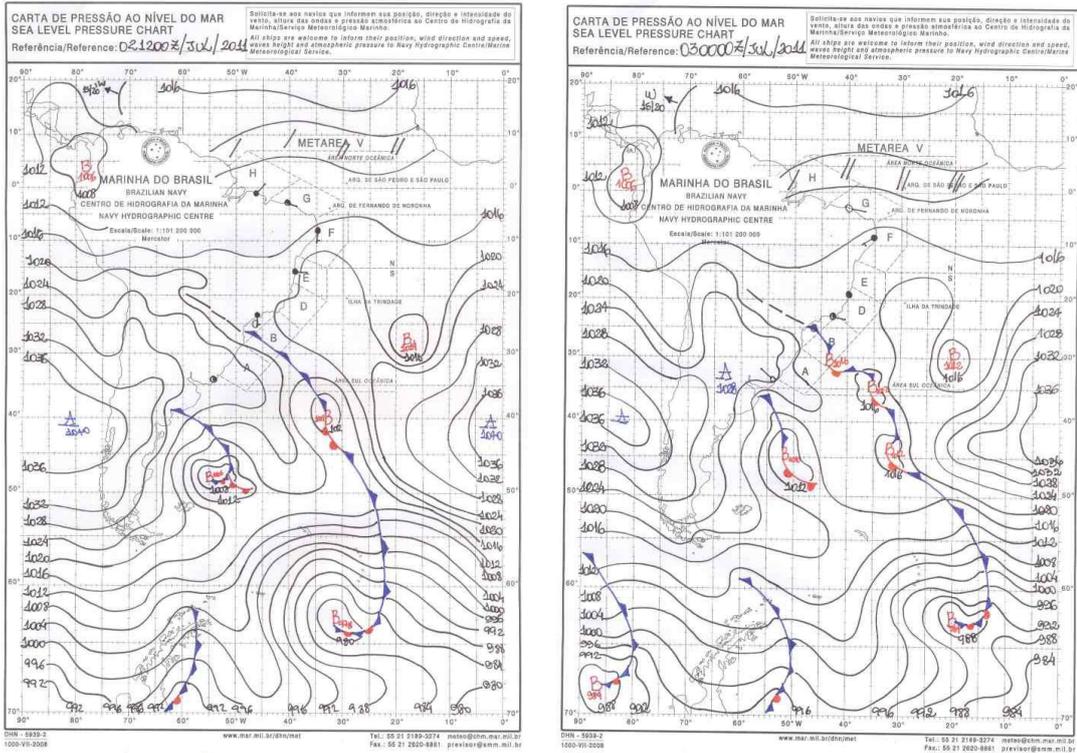
Figura 4.4 - Série temporal da temperatura ar a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

O valor mínimo de TAR2M (15,8°C) ocorreu em 04/07/2011 as 05h GMT (02h local) após a passagem de uma frente fria pela região da boia de santos conforme pode ser observado na Figura 4.5. Já o valor máximo (27,7°C) foi observado durante o verão, em 24/02/2012 as 19h GMT (16h local).

Figura 4.5- Cartas sinóticas do centro de hidrografia da marina para 02072011\_12Z e 03072011\_00Z



Fonte: CHM

A média e a mediana da TAR2M (Quadro 6) foram exatamente iguais (22,6°C) apresentando uma pequena diferença (0,2°C) para a o valor da moda. Os valores mais frequentes ficaram entre 21,8°C e 22,6°C.

Quadro 6 - Parâmetros Estatísticos da Temperatura do ar a 2 metros

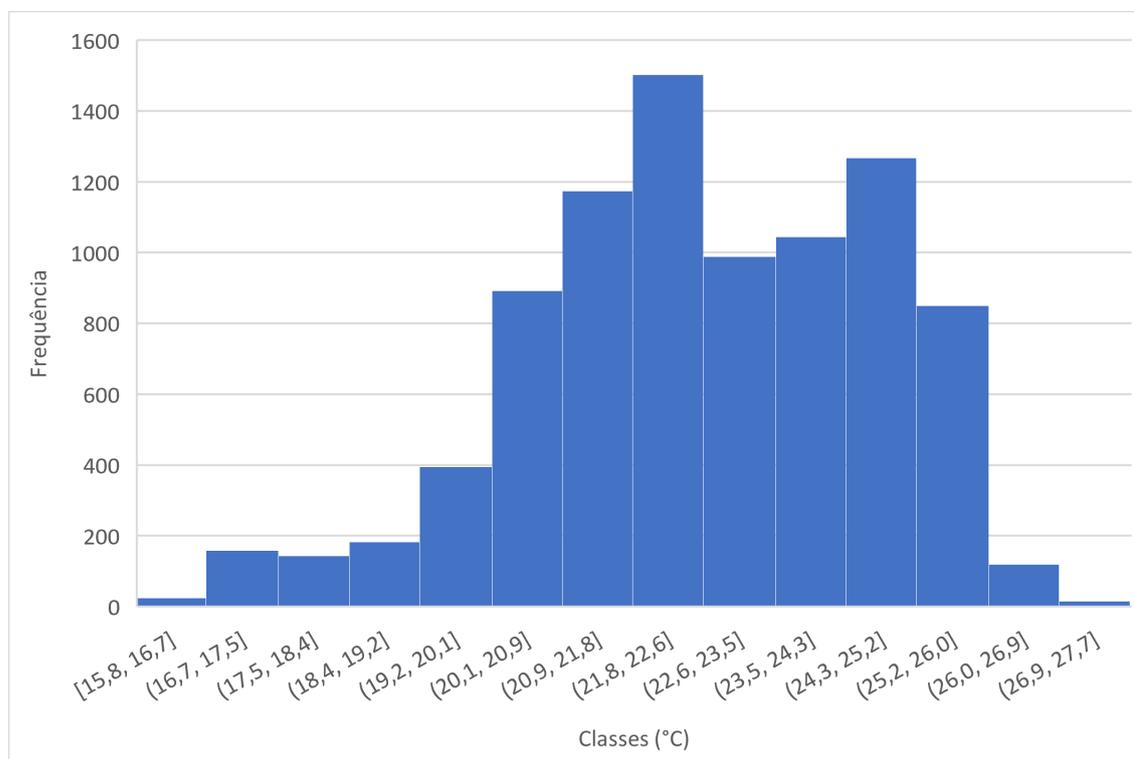
TAR2M	
<b>MÉDIA</b>	22,60°C
<b>MEDIANA</b>	22,60°C
<b>MODA</b>	22,40°C
<b>DESVIO PADRAO</b>	2,07°C
<b>VARIANCIA</b>	4,29°C <sup>2</sup>
<b>ASSIMETRIA</b>	-0,40

Fonte: Autor

A variância foi de 4,29°C<sup>2</sup> com um desvio padrão de 2,07°C, caracterizando uma pequena dispersão em torno da média. O coeficiente de assimetria é -0,4, o que indica uma baixa ocorrência dos menores valores (TAR2M < 17°C), que estiveram associados com as frentes frias mais intensas. Vê-se, ao contrário da TSM, que a cauda mais longa da

distribuição fica à esquerda (Figura 4.6), em concordância com o valor negativo do coeficiente de assimetria.

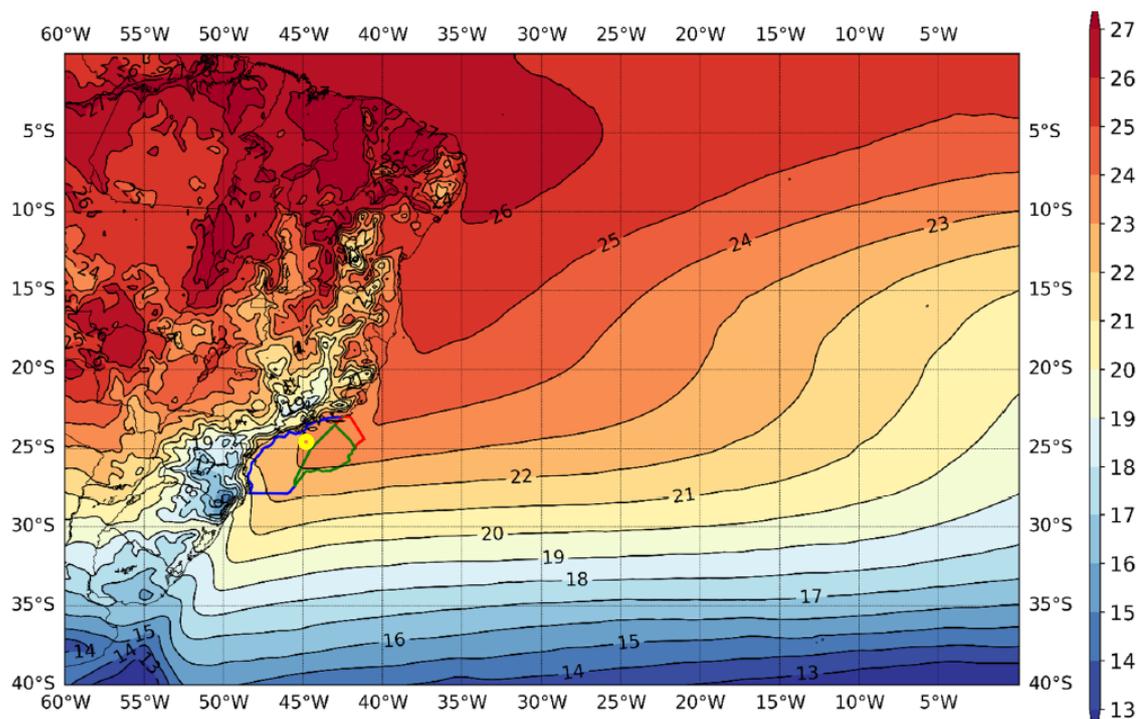
Figura 4.6 - Histograma da Série temporal da temperatura ar a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

Na Figura 4.7 está apresentada a normal climatológica da TAR2M dos dados de reanálise do ERA5 (DERECZYNSKI, 2022) com a localização da Boia de Santos indicada pelo círculo amarelo. Neste local pode-se observar que a média climatológica excede ligeiramente 23°C. Sendo assim, a média do período observado no presente trabalho é inferior cerca de 0,4°C a 0,5°C, mas considerando que de acordo com Dereczynsky (2022) o ERA5 subestima TAR2M em 1°C, então a TAR2M no período JUN/2011-JUN/2012 pode ter apresentado uma anomalia positiva, caracterizando um período mais quente.

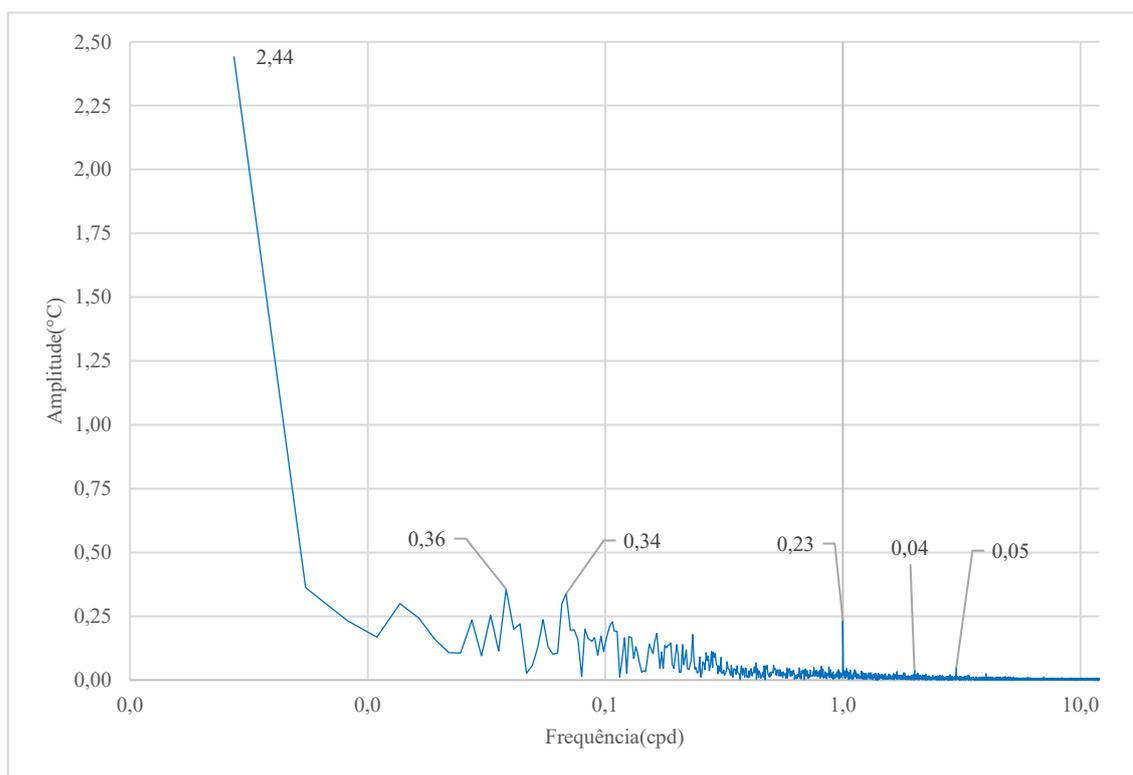
Figura 4.7 - Climatologia Anual TAR2M (1991-2022) calculada com dados do ERA5



Fonte: adaptado de DERECZYNSKI, 2022

Com a finalidade de verificar quais são as principais forçantes que estão causando a variação da TAR2M, cuja energia é oriunda indiretamente da superfície do mar, dado que a TSM é maior em média que a TAR2M, foi obtido o espectro de amplitude (Figura 4.8).

Figura 4.8 - Espectro de Amplitude da Série temporal da temperatura ar a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

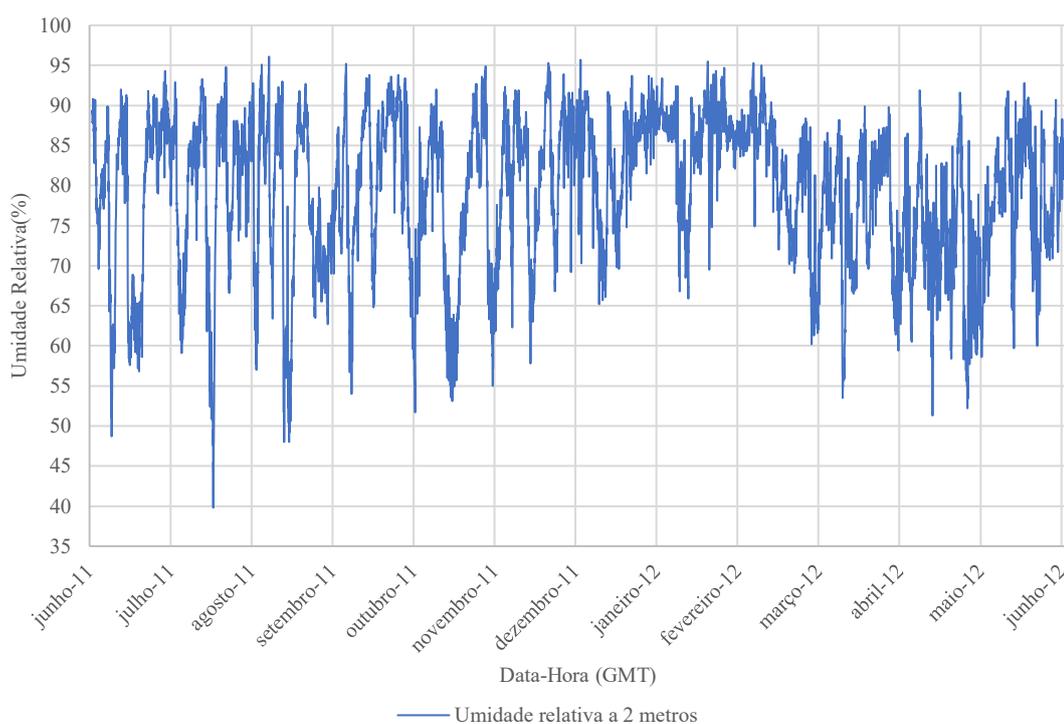
Vê-se nitidamente a frequência de 1 ciclo por dia (24h) devido à forçante térmica radiacional com amplitude de 0,23°C, ocorrendo ainda uma componente semidiurna (12h) e outra terdiurna (8h) tendo amplitudes respectivamente iguais a 0,04°C e 0,05°C, conforme sinalizado no gráfico do espectro. Após esse pico de energia, no sentido das frequências mais baixas ocorreu um aumento da energia dentro da banda sinótica, ressaltando-se os seguintes picos: 0,34°C (14 dias) e 0,36°C (26 dias). A maior amplitude, com 2,44°C, foi a da componente anual. Ressalta-se a semelhança entre os espectros de TAR2M e TSM, indicando a dominância da energia espectral da banda sazonal, além do pico de 1 cpd da banda diurna.

A correlação entre a TSM e a TAR2M foi 0,87, indicando que essas variáveis têm forte associação positiva. O que pode ser justificado pelo fato de a TAR2M ser aquecida indiretamente e principalmente pela superfície do oceano. Isso é refletido também pela forma semelhante das series temporais, bem como pelo fato de possuírem uma parecida distribuição de energia nas bandas diurna, sazonal e sinótica.

### 4.1.3 UR2M E q2M

É possível observar na Figura 4.9 que a UR2M tem uma pequena variação entre as estações do ano (85-95%), com sobreposição de intensas diminuições de 20 a 50%, que ocorreram com periodicidades de 7 a 30 dias. Essas quedas abruptas estão provavelmente associadas com a passagem das frentes frias. Esses sistemas têm periodicidades nesses intervalos, conforme discutido para TAR2M.

Figura 4.9 - Série temporal da umidade relativa a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

O menor valor da UR2M (39,8%) ocorreu em 05/08/2011, as 11h GMT (8h local), dois dias após a passagem de uma frente fria, e a maior UR2M ocorreu em 26/08/2011 as 10h GMT (7h local).

A média da UR2M(Quadro 7) foi de 79,28%, enquanto a mediana e a moda foram de 81,6% e 86,9% respectivamente. Apresentando um comportamento assimétrico da distribuição dos dados, sendo os valores mais frequentes de UR2M entre 84% e 88%. Desta maneira, a cauda mais longa fica à esquerda, caracterizando uma assimetria negativa (-0,73).

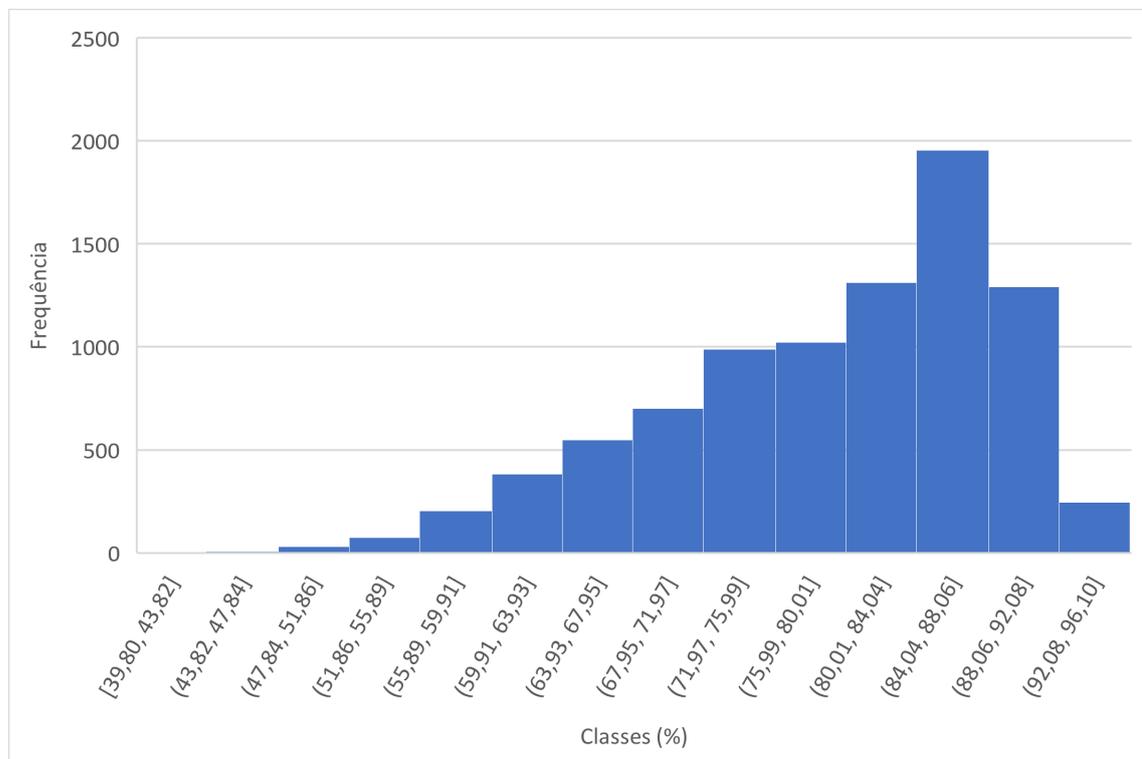
Quadro 7 - Parâmetros Estatísticos da Umidade relativa a dois metros

UR2M	
<b>MÉDIA</b>	79,28%
<b>MEDIANA</b>	81,60%
<b>MODA</b>	86,90%
<b>DESVIO PADRAO</b>	9,40%
<b>VARIANCIA</b>	88,34% <sup>2</sup>
<b>ASSIMETRIA</b>	-0,73

Fonte: Autor

No histograma de UR2M (Figura 4.10) vê-se nitidamente a cauda mais longa à esquerda, influenciada principalmente pelas quedas intensas associadas com as passagens de frentes frias na banda sinótica. A variância da UR2M foi de 88,34(%)<sup>2</sup> e seu desvio padrão foi de 9,4% configurando uma maior dispersão dos dados em torno da média.

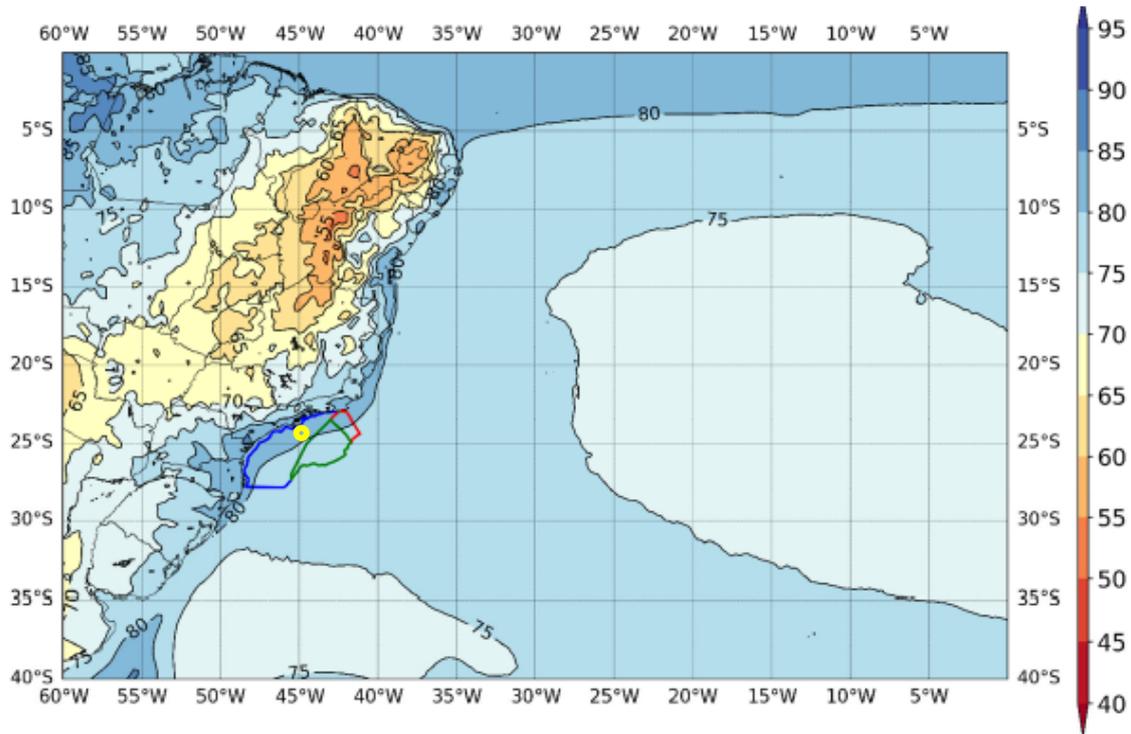
Figura 4.10 - Histograma Série temporal da umidade relativa a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

A Figura 4.11 apresenta a climatologia anual da UR2M (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022) podendo-se observar que a UR2M média para região de estudo é 80%, praticamente igual a UR2M média obtida no presente trabalho.

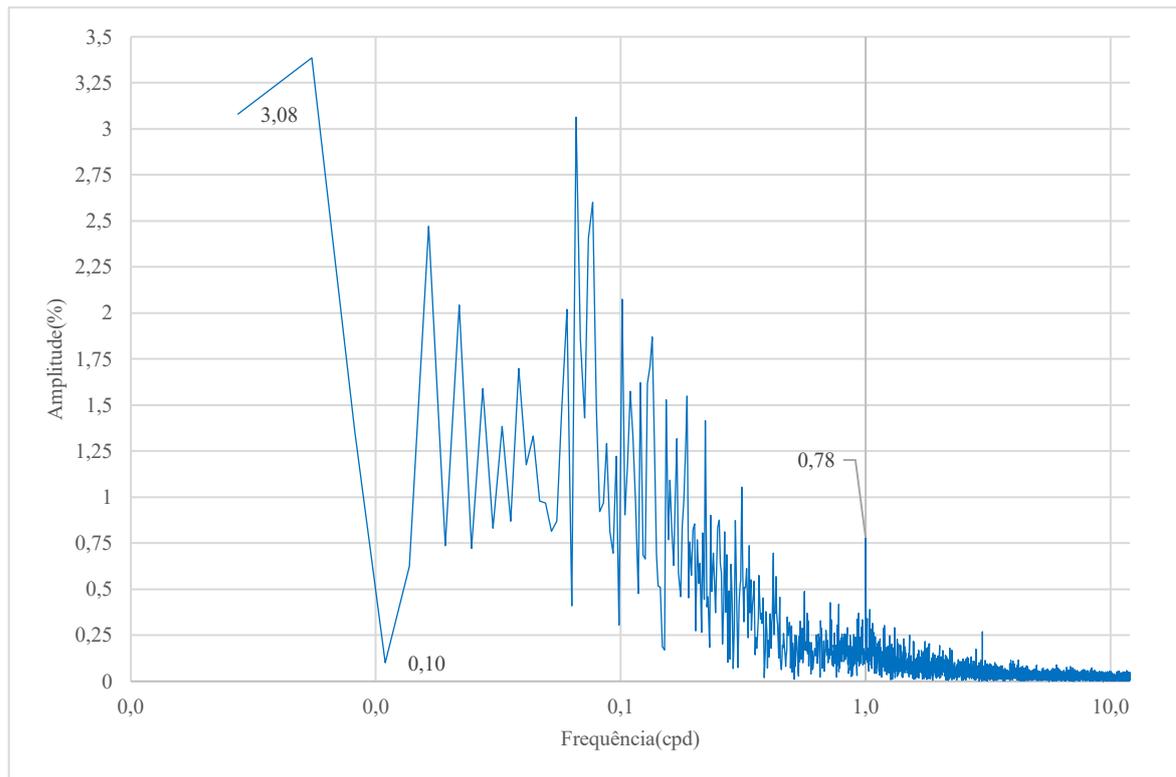
Figura 4.11 - Climatologia Anual UR2M (1991-2022) calculada com dados do ERA5



Fonte: adaptado de DERECZYNSKI, 2022

Na Figura 4.12 está apresentado o espectro de amplitude da UR2M, tendo um pico nítido na frequência diurna (24h) com amplitude de 0,78%, indicando uma influência da forçante térmica diurna. Na banda sinótica, as amplitudes crescem, apresentando picos entre 0,31 cpd (3 dias) e 0,065 (15 dias) com amplitudes crescentes. Novamente, sugere-se a influência das frentes frias sobre a UR2M. Destaca-se também a presença de um vale na frequência de 0,01 cpd (91 dias), concentrando assim a energia sazonal nas componentes semestral e anual, ambas tendo amplitudes próximas (3,3 e 3,1%).

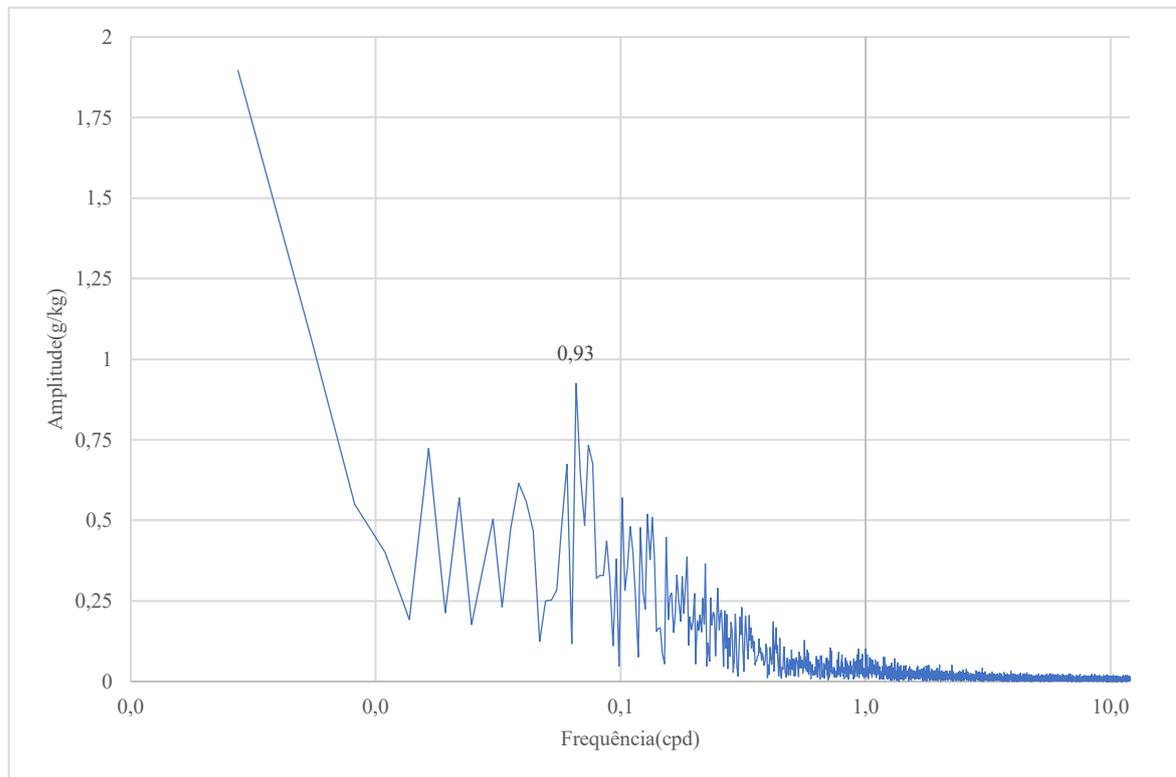
Figura 4.12 - Espectro da Amplitude Série temporal da umidade relativa a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

A q2M, entretanto, apresenta um comportamento diferente (Figura 4.13). Na frequência diurna não se observa um pico nítido, o mesmo ocorre na frequência de 3 cpd, contrastando com a UR2M cujo pico de 1 cpd é significativo. Isso reflete que a principal influência na variação diurna da UR2M é da TAR2M e não de q2M. Destaca-se o pico de amplitude 0,93g/kg que ocorre da frequência de 0,065 cpd (15 dias), provavelmente associado com a passagem de frentes frias.

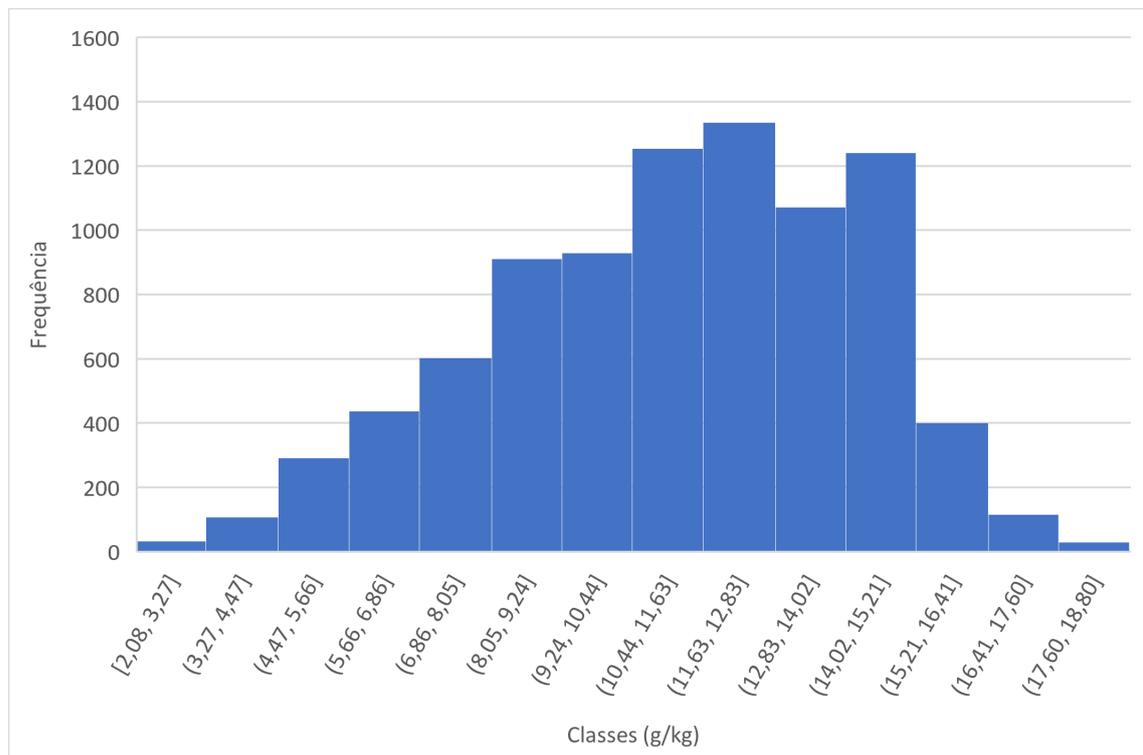
Figura 4.13 - Espectro da Amplitude da Série temporal da umidade específica a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

A q2M também apresentou histograma com uma ligeira assimetria negativa (Figura 4.14), provavelmente associada com a presença do ar seco trazido pelas frentes frias.

Figura 4.14 - Histograma de dados da Série temporal da umidade específica a 2 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012

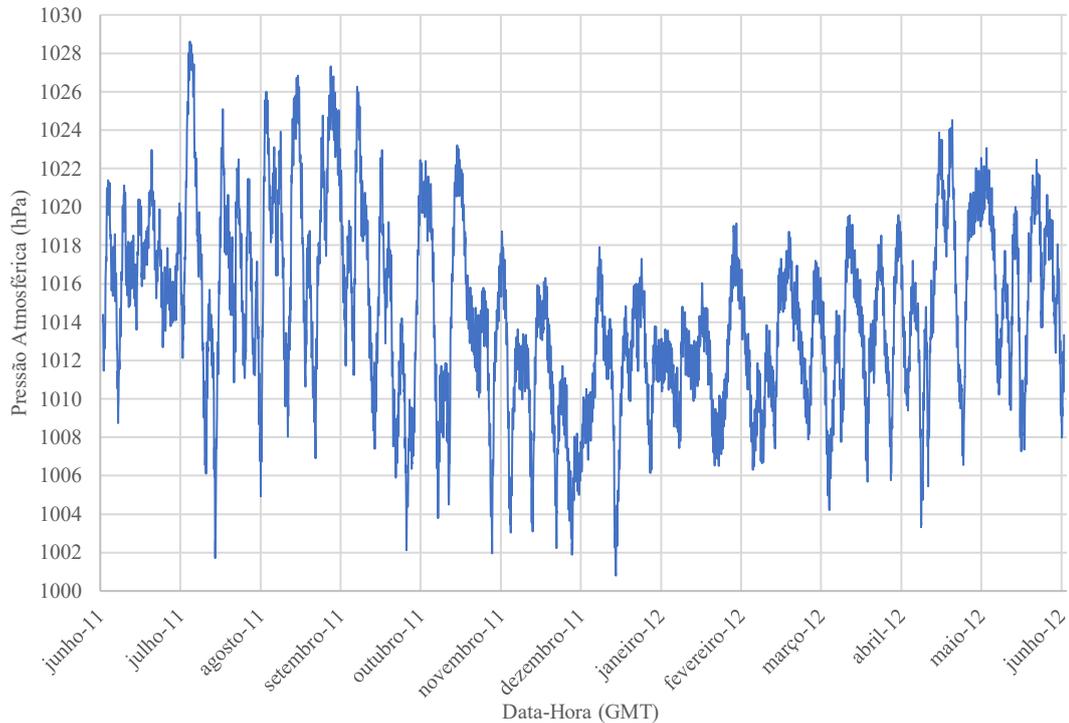


Fonte: Autor

#### 4.1.4 PNMM

A pressão atmosférica ao nível médio do mar tem a série anual apresentada na Figura 4.15. Observa-se ao longo do inverno a presença dos maiores valores de PNMM (>1024 hPa), juntamente com vales intensos, associados às quedas bruscas de pressão atmosférica, durante a passagem de sistemas frontais. Em seguida a PNMM segue em queda durante a primavera, mas ainda com oscilações de amplitudes relativamente grandes, atingindo valores mínimos no verão. Em seguida a pressão aumenta durante o outono, mas sempre com as variações associadas com as frentes frias, isto é, dentro de um mês como a escala da Figura 4.15 permite identificar.

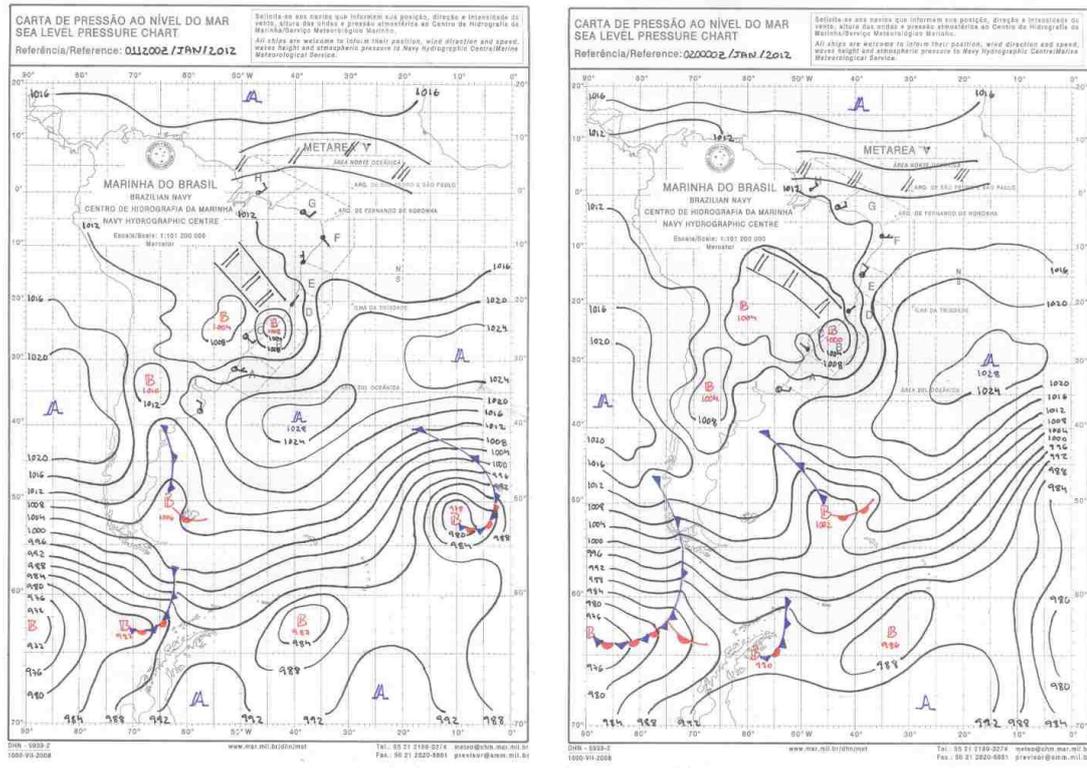
Figura 4.15 - Série temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

O mínimo da PNMM 1000,8 hPa ocorreu em 01/01/2012 as 19h GMT (16h local) durante a formação de dois centros de baixa pressão, um sobre a costa dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, e outro sobre o continente também no estado de São Paulo, ambos concomitantes com a ocorrência de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul, conforme a Figura 4.16. Enquanto a PNMM máxima 1028,61 hPa ocorreu em 24/07/2011 às 03h GMT (00h local).

Figura 4.16 - Cartas sinóticas 01012012\_12Z e 02012011\_00Z



Fonte: CHM

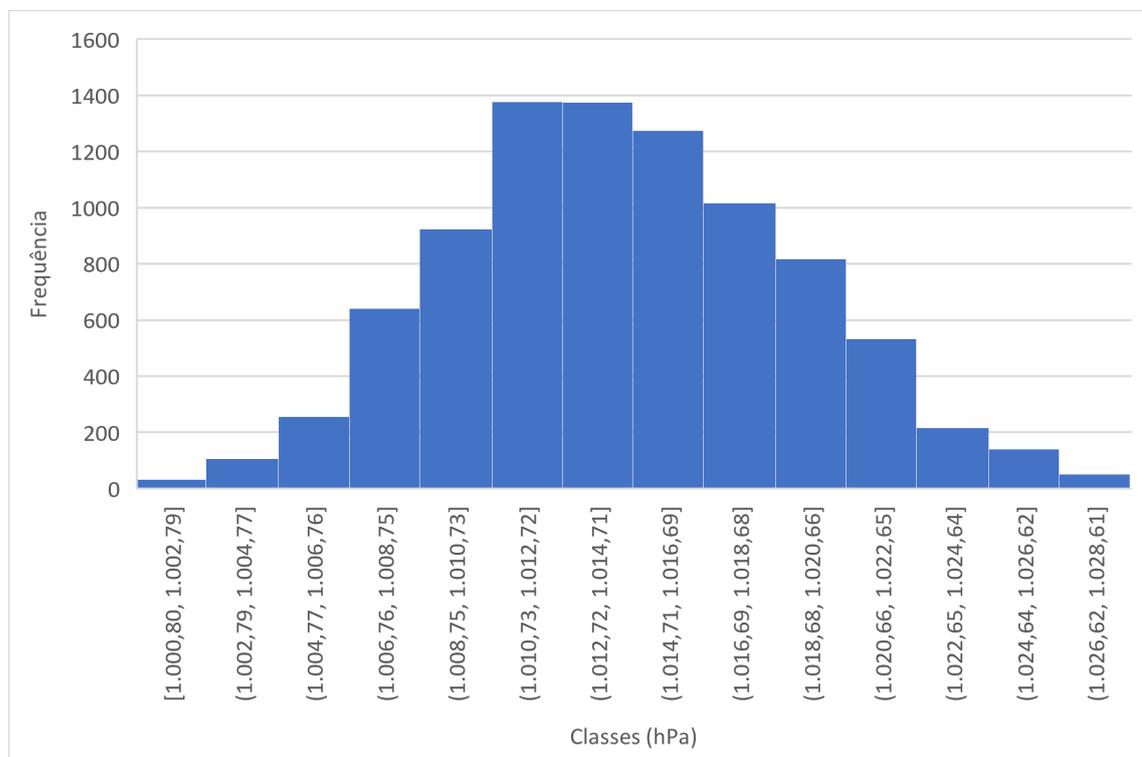
A média anual da PNMM (1014,46 hPa) é aproximadamente igual a sua mediana (1014,22 hPa), com ambas (Quadro 8) diferenciando da moda (1011,67 hPa). Os valores mais frequentes estão entre 1010,73 e 1014,71. A variância para a PNMM foi de 22,29 hPa<sup>2</sup> e seu desvio padrão foi de 4,79 hPa. A PNMM tem uma distribuição com coeficiente de assimetria igual a 0,58, sendo bimodal com a segunda classe de valores frequentes tendo pressões entre 1010,7 e 1012,7 hPa (Figura 4.17). Esse padrão está associado com as pressões mais altas que ocorreram no inverno e outono, apesar das intensas variações nessas estações quando as frentes frias são mais intensas.

Quadro 8 - Parâmetros Estatísticos da Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar

PNMM	
<b>MÉDIA</b>	1014,46 hPa
<b>MEDIANA</b>	1014,2 hPa <sup>2</sup>
<b>MODA</b>	1011,67 hPa
<b>DESVIO PADRAO</b>	4,79 hPa
<b>VARIANCIA</b>	22,99 hPa <sup>2</sup>
<b>ASSIMETRIA</b>	0,16

Fonte: Autor

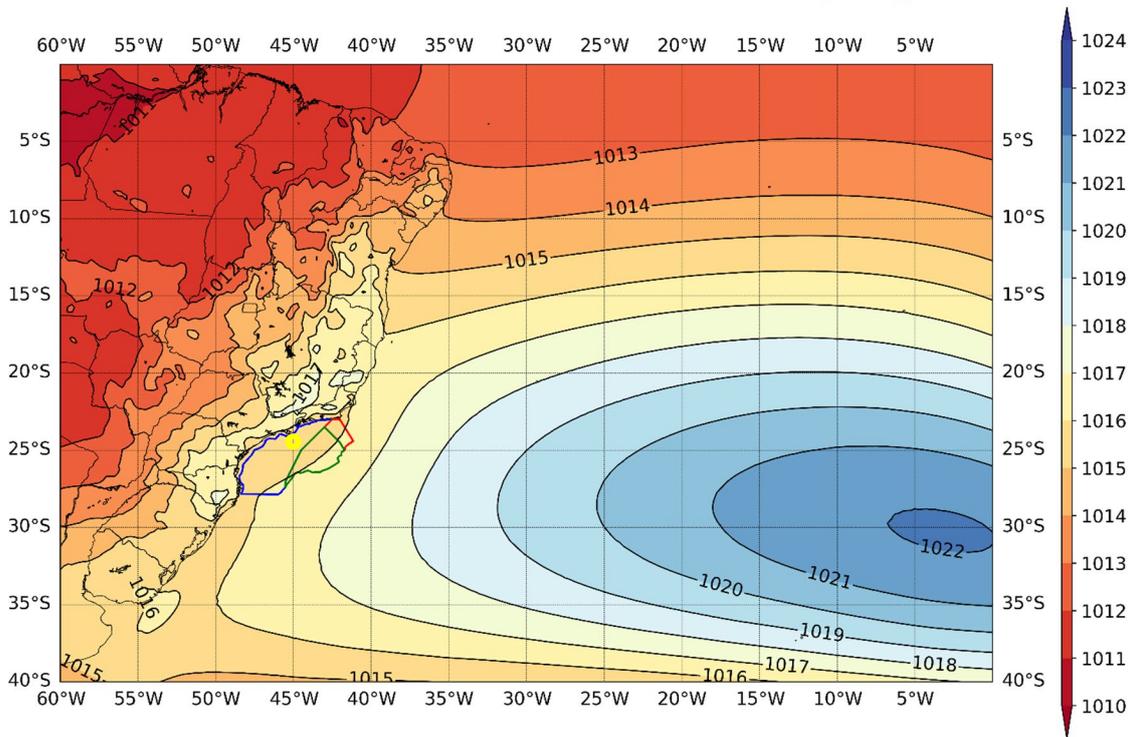
Figura 4.17 - Histograma de dados da Série temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

Na climatologia de 30 anos da PNMM com dados de reanálise do ERA5 contendo a localização da Boia meteoceanográfica (círculo amarelo) cujos dados foram analisados neste trabalho (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022), Figura 4.18, observa-se que a PNMM varia entre 1015 hPa e 1016 hPa, estando 1 hPa acima dos valores do presente trabalho.

Figura 4.18 - Climatologia Anual PNMM (1991-2022) calculada com dados do ERA5

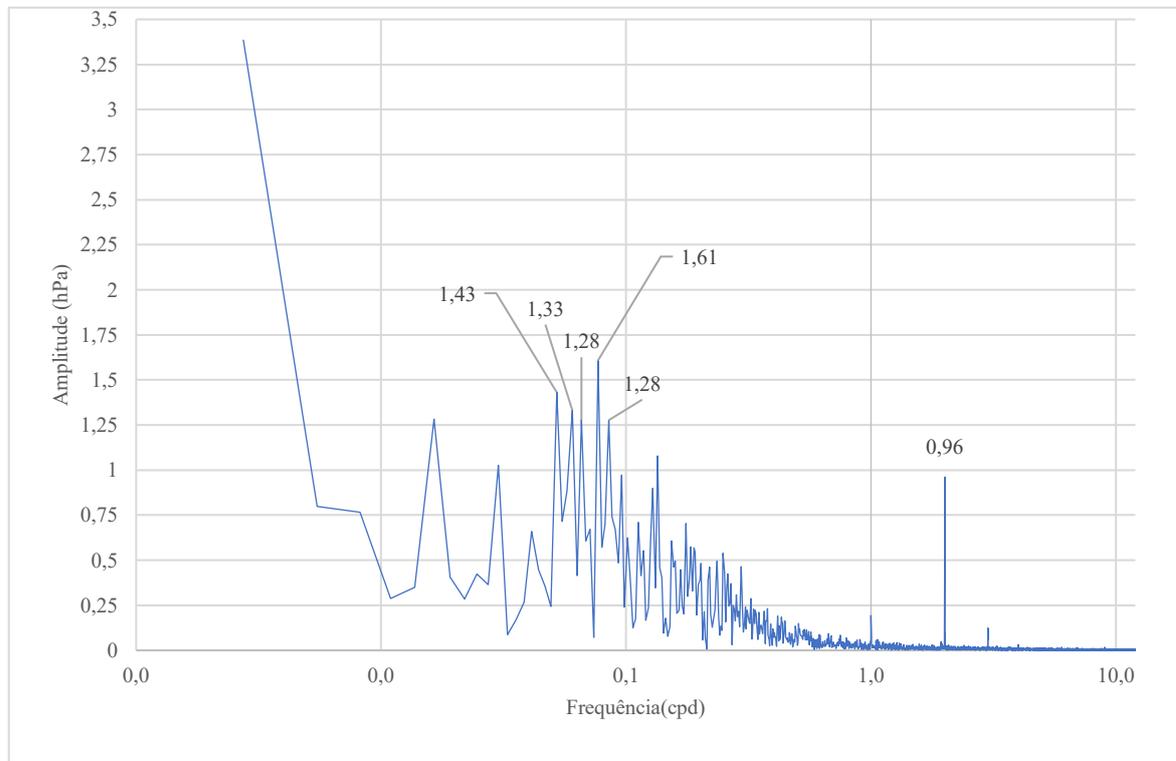


Fonte: adaptado de DERECZYNSKI, 2022

No espectro da amplitude da PNMM, Figura 4.19, vê-se um pico significativo com amplitude de aproximadamente 1hPa quando comparado aos demais, na frequência 2 cpd (semidiurna), caracterizando a maré barométrica. De acordo com Dai (2023) esse fenômeno é devido a propagação de ondas com contribuição do número de onda 2, que são ondas que têm duas cristas e dois vales ao redor de  $360^\circ$ , se propagando para oeste, portanto, com periodicidade semidiurna, principalmente em baixas e médias latitudes. Também de acordo com (Lindzen,1979), a atmosfera tem uma livre oscilação com número de onda zonal 2 e um período de 12 horas, o qual entra em ressonância com uma pequena forçante térmica semidiurna. Segundo esse autor, essa componente semidiurna está associada com o período efetivo de aquecimento solar que seria de 12h. Vê-se no espectro a ocorrência dessa pequena amplitude ( $\sim 0,1$  hPa) da componente semidiurna (0,5 cpd). Na banda sinótica, entre as frequências de 0,1429 cpd (7 dias) e 0,0476 cpd (21 dias) destacam-se os principais picos com amplitude superiores as da maré barométrica; 0,05 cpd (19 dias) com amplitude 1,43 hPa; 0,06 (16 dias) com amplitude 1,33 hPa; 0,065 cpd (15 dias) com amplitude 1,28 hPa; 0,07 cpd (13 dias) com amplitude 1,61 hPa; e 0,08 (11 dias) com amplitude 1,28 hPa, provavelmente associados com a passagem de frentes frias. Ressalta-se também a semelhança entre os espectros de UR2M,

q2M e PNMM no que diz respeito ao crescimento exponencial da amplitude ao longo da banda sinótica. Para a TSM esse crescimento não é tão expressivo, embora ocorra também.

Figura 4.19 - Espectro de amplitude da Série temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar no período de 21/06/2011 a 20/06/2012

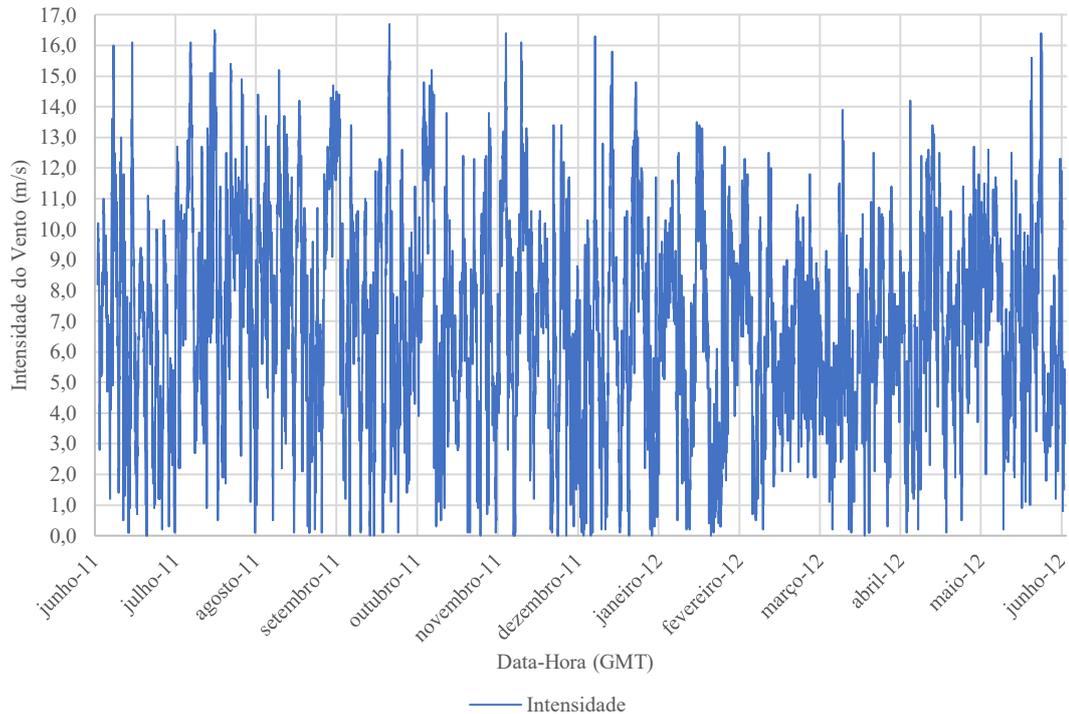


Fonte: Autor

#### 4.1.5 V10M e DIR10M

O comportamento da intensidade do Vento a 10 metros, Figura 4.20, é regular ao longo do ano, apresentando picos acima de 15 m/s em todas as estações, com exceção do final do verão de 2012 e início do outono de 2012. Pode-se observar oscilações da magnitude do vento de 1,5 m/s a 16 m/s, ocorrendo entre as bandas diurna e sinótica principalmente.

Figura 4.20- Série temporal da intensidade do vento a 10 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

A V10M máxima (16,7 m/s) ocorreu as 06h GMT (3h local) em 09/10/2011 e não está relacionada a passagem de frente fria ou a formação de um centro de baixa pressão.

A intensidade média do vento para região (Quadro 9) foi de 6,98 m/s, aproximadamente igual a mediana (6,90 m/s), sendo ambas menores do que a moda (7,90 m/s) apresentando uma assimetria negativa (-0,28) na distribuição dos dados. A classe mais frequente tem magnitudes entre 7,16 m/s e 8,35 m/s, a variância foi de 10,8 m/s<sup>2</sup> e o desvio padrão 3,29 m/s configurando uma dispersão em torno da média que pode estar associada com as mudanças de posicionamento do ASAS assim como com a passagem de frentes frias ou variações diurnas.

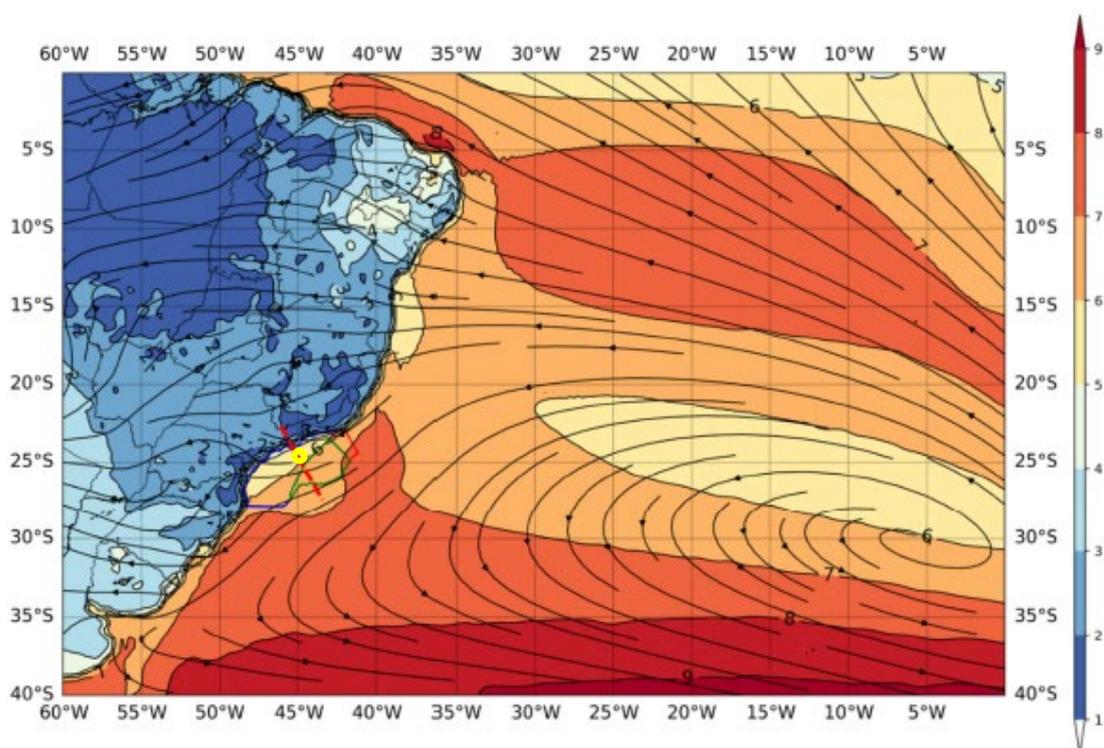
Quadro 9 - Parâmetros Estatísticos do Vento a 10 metros

V10M	
<b>MÉDIA</b>	6,98 m/s
<b>MEDIANA</b>	6,90 m/s
<b>MODA</b>	7,90 m/s
<b>DESVIO PADRAO</b>	3,29 m/s
<b>VARIANCIA</b>	10,80 (m/s) <sup>2</sup>
<b>ASSIMETRIA</b>	-0,28

Fonte: Autor

A normal climatológica anual da intensidade do vento a 10 metros para um ano é de 6 m/s, figura 4.21 (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022), de modo que os dados da boia de santos estão em média 0,9 m/s maiores. Entretanto, como de acordo com essa autora os dados do ERA5 estão subestimados em 2 m/s, então pode ter ocorrido no período do presente trabalho uma anomalia positiva de V10M.

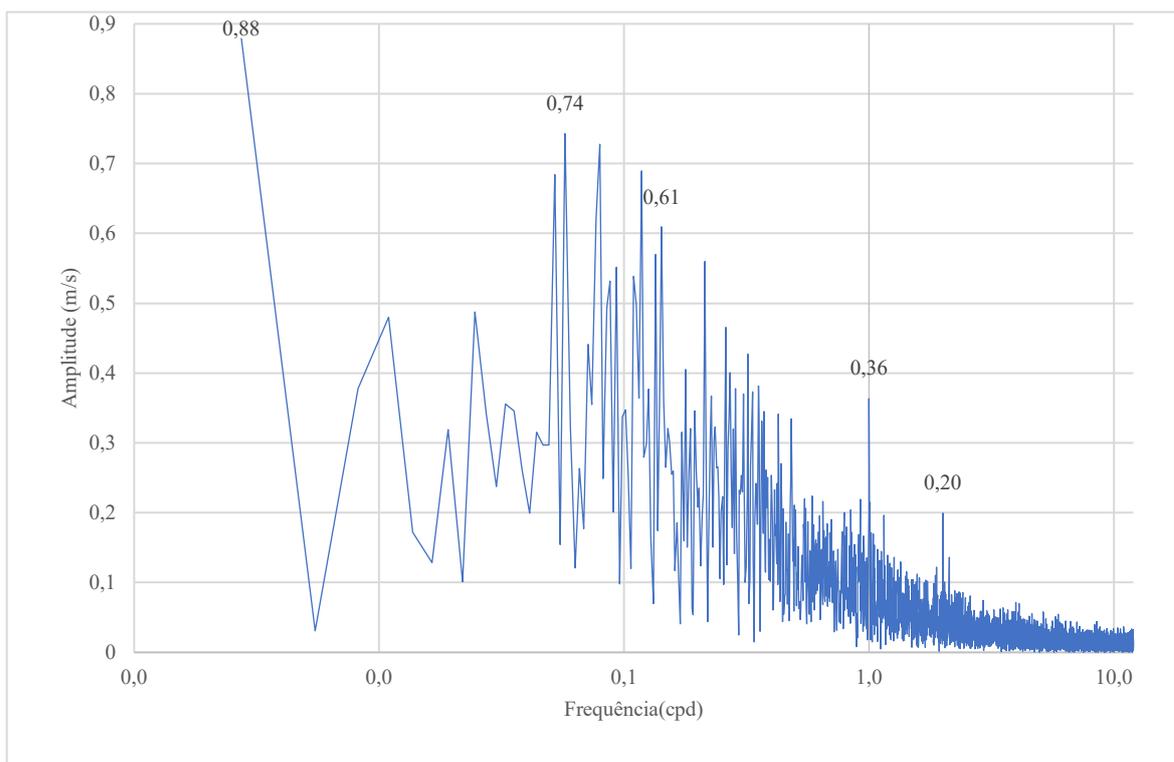
Figura 4.21- Climatologia Anual V10M (1991-2022) calculada com dados do ERA5



Fonte: adaptado de DERECZYNSKI, 2022

Pode-se observar no espectro de amplitude da V10M (Figura 4.22) picos nas frequências de 1 cpd (diurno) e 2 cpd (semidiurno) com amplitudes 0,36 m/s e 0,20m/s respectivamente. A amplitude da intensidade do vento é maior nas frequências mais baixas que compõem a banda sinótica, com as maiores amplitudes de 0,61 m/s a 0,74 m/s entre as frequências 0,0476 cpd (21 dias) e 0.1429 (7 dias), estando provavelmente associadas com a passagem de frentes frias. A componente anual apresentou a maior amplitude (0,88 m/s).

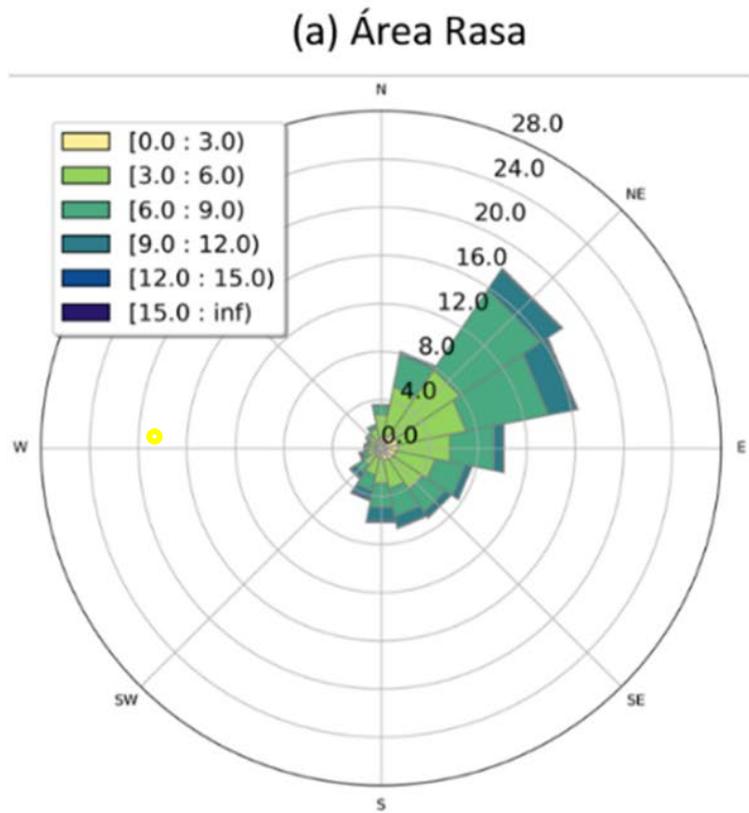
Figura 4.22 - Espectro de amplitude da série temporal da intensidade do vento a 10 metros no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

Quanto à direção do vento, observa-se na Figura 4.23 que a direção da normal climatológica do vento é Nordeste (NE), ocorrendo por causa da ação da ASAS e seu giro anticiclônico. A distribuição de frequência da ocorrência direcional dos ventos, Figura 4.23 (DERECZYNSKI, *et al.*, 2022) destaca que as direções NE são as mais frequentes, sendo a que possui também maior ocorrência de ventos entre 6 m/s e 9 m/s.

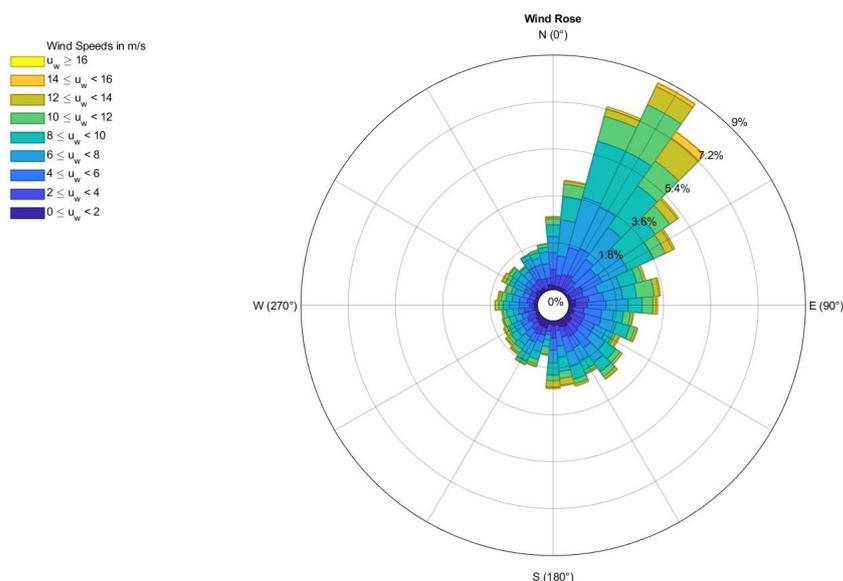
Figura 4.23 - Climatologia Anual V10M (1991-2022) calculada com dados do ERA5



Fonte: adaptado de DEREZYNSKI, 2022

A distribuição de frequência da ocorrência direcional dos ventos observados na boia, figura 4.24, apresenta comportamento similar ao obtido por Derezynski (2022), também com as direções mais frequentes NE, e com maior ocorrência de ventos entre 8 m/s e 10 m/s também na direção nordeste, porém esses extremos são mais intensos do que aqueles obtidos por DEREZYNSKY(2022), confirmando a anomalia positiva supracitada.

Figura 4.24 - Distribuição de frequência da ocorrência direcional do vento

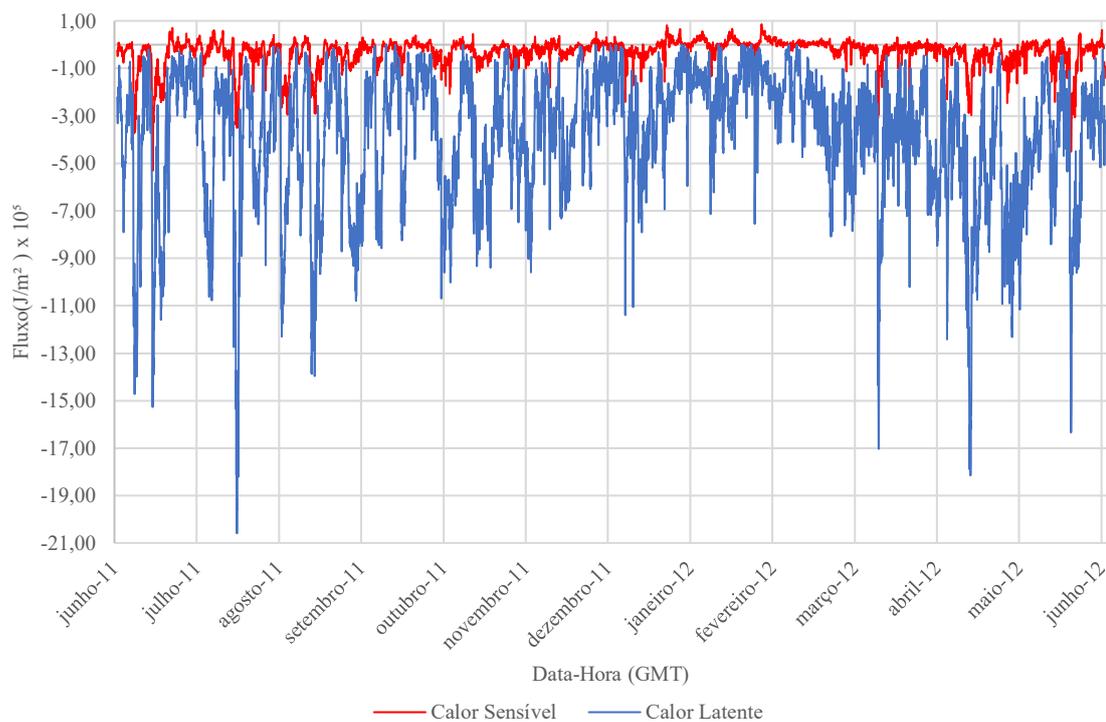


Fonte: Autor

#### 4.1.6 Fluxos de calor latente e Calor sensível

Nas Figura 4.25 estão apresentados os fluxos de SH e LH em  $\text{J/m}^2$ . Fluxos negativos indicam que o oceano está perdendo calor. É notável que os fluxos de calor latente foram sempre negativos, o mesmo ocorrendo para o calor latente com poucas exceções. Ressalta-se que os valores de LH são uma ordem de grandeza superiores aos de SH, conforme observado também por Rossato (2019) em estudos no oceano Atlântico Sul. Pode-se ver também que as maiores perdas de LH ( $-20,59 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ ) ocorrem no inverno, diminuindo no verão. O mesmo ocorreu com os valores de SH. Tais fatos ocorrem porque no inverno, principalmente durante a passagem das frentes frias, tanto as magnitudes do vento quanto os gradientes verticais de temperatura e de umidade nos primeiros dois metros de altitude, foram em geral maiores. Tendo em vista que os fluxos de calor sensível e latente são respectivamente proporcionais às diferenças de temperatura e de umidade específica na interface oceano-atmosfera, então esses resultados indicam que nessa região de borda da plataforma continental, por onde usualmente a CB escoia (Souza,2000), tem a TSM quase sempre maior que a TAR2M, assim como umidade específica superficial (imediatamente sobre a superfície do mar) maior que a q2M. A diferença positiva entre as médias da TSM ( $23,2^\circ\text{C}$ ) e TAR2M ( $22,6^\circ\text{C}$ ) também indica que essa região é de perda de calor oceano para a atmosfera. Sendo assim, sugere-se que o ar sobrejacente à CB é úmido e instável, sendo favorável aos movimentos turbulentos ascendentes.

Figura 4.25 - Série temporal dos fluxos de calor no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

Ressalta-se também que as perdas de calor mais intensas, chegando a atingir  $-20,6 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup> de calor latente e  $-5,3 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup> sensível, ocorreram durante a passagem de frentes frias. A discussão mais detalhada desses resultados está apresentada na seção 4.3 sobre as variações sinóticas.

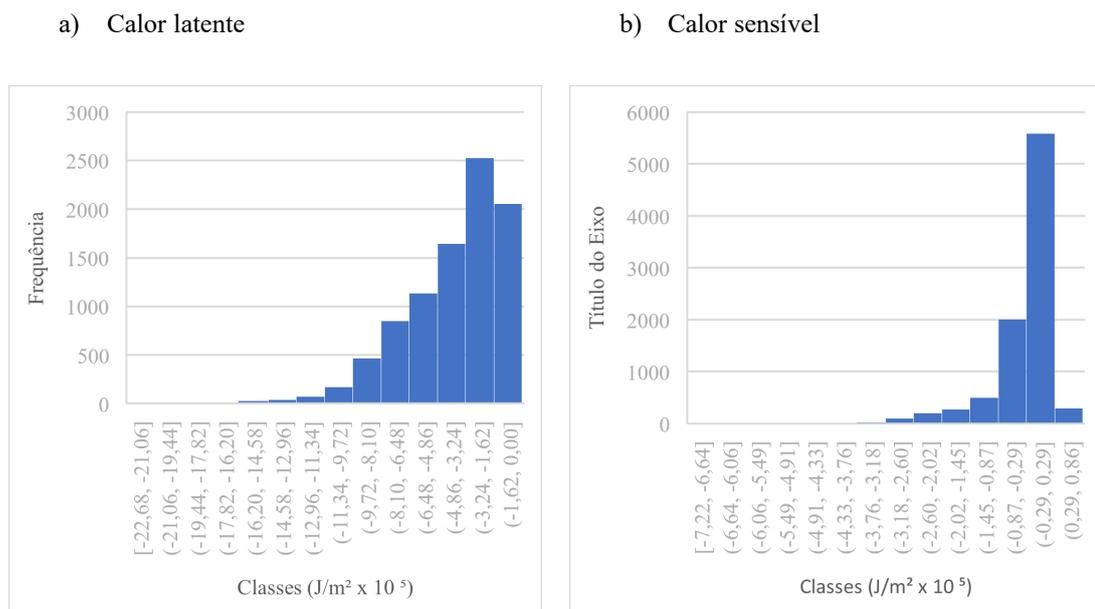
Os fluxos médios de calor latente e sensível (Quadro 10) foram respectivamente iguais a  $-3,16 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup> e  $-0,12 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup>, tendo respectivamente desvios padrão de  $-2,82 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup> e  $-0,57 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup> e moda de  $-1,63 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup> e  $0,01 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup>. Deste modo, ambos os fluxos apresentam assimetria de distribuição (Figura 4.26), com o LH tendo grau de assimetria igual a -1,3 e SH apresentando assimetria positiva equivalente a 1,78.

Quadro 10 - Parâmetros Estatísticos dos fluxos de calor latente e sensível

fluxos de calor	latente	sensível
<b>MÉDIA</b>	$-3,83 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$	$-0,29 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$
<b>MEDIANA</b>	$-3,10 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$	$-0,12 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$
<b>MODA</b>	$-1,63 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$	$0,01 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$
<b>DESVIO PADRAO</b>	$2,82 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$	$0,57 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}$
<b>VARIANCIA</b>	$7,96 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}^2$	$0,33 \times 10^5 \text{ (J/m}^2 \text{)}^2$
<b>ASSIMETRIA</b>	-1,30	1,78

Fonte: Autor

Figura 4.26 - Histogramas das Séries temporais dos fluxos de calor no período de 21/06/2011 a 20/06/2012



Fonte: Autor

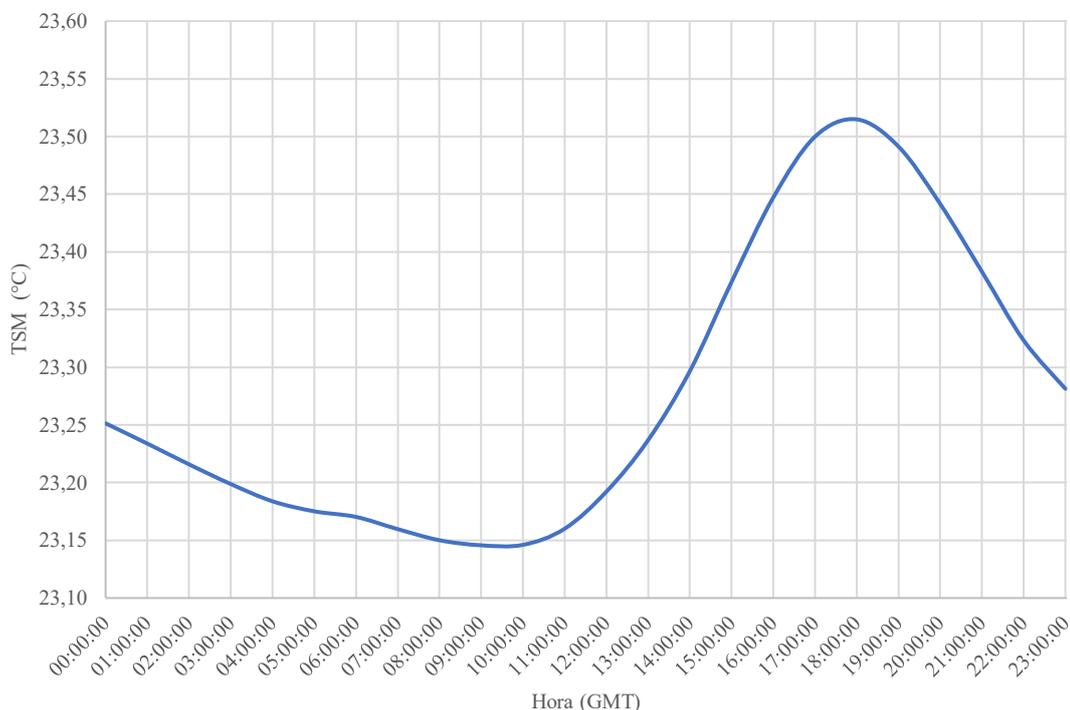
## 4.2 Ciclos Diurnos das propriedades meteoceanográficas

### 4.2.1 TSM

O ciclo diurno anual da TSM está apresentado na Figura 4.27, no qual pode ser observada uma amplitude térmica de aproximadamente  $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , com os valores mínimo ( $23,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e máximo ( $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ocorrendo respectivamente às 10:00 (7:00 local) e 18:00 (15:00 local) respectivamente. De acordo com Dai (2023) e Kawai & Wada (2007), essa variação diurna é causada pela radiação solar e pela rotação da terra. O aquecimento diurno da TSM torna-se mais evidente quando o vento superficial é fraco e a insolação é forte. A amplitude diurna da

TSM é em média da ordem de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , podendo exceder  $5^{\circ}\text{C}$  em situações extremas (Kawai & Wada, 2007).

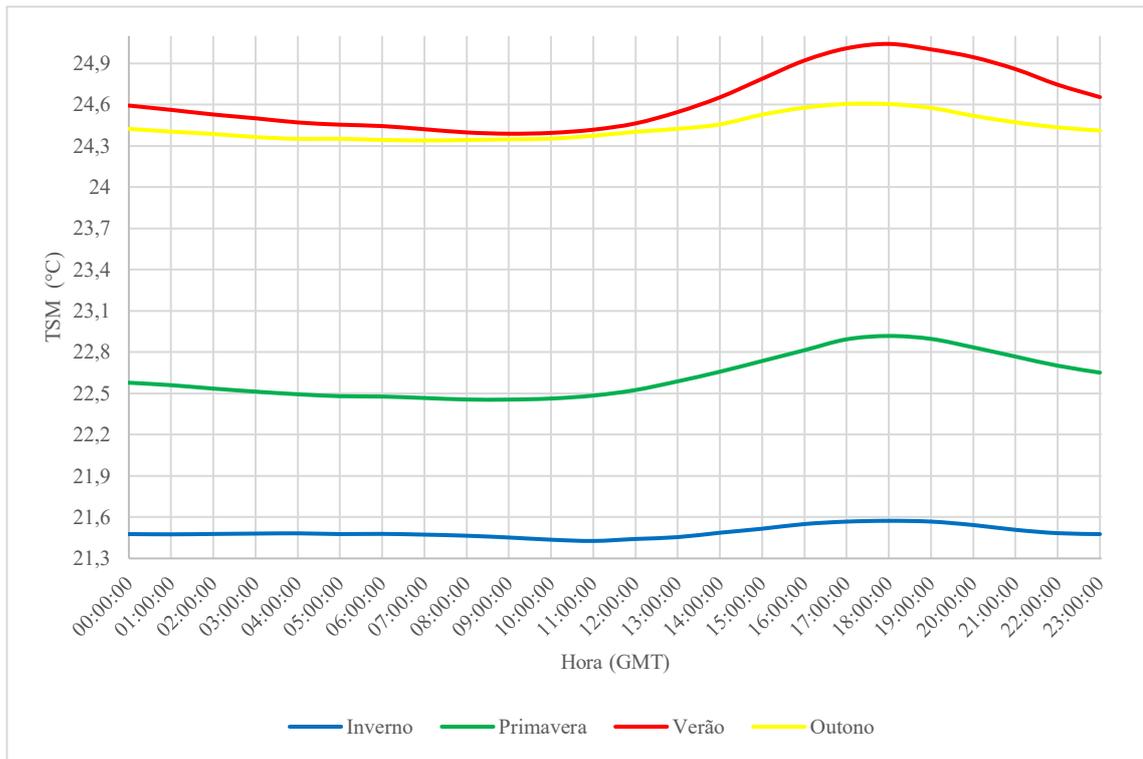
Figura 4.27 - Ciclo Diurno da Temperatura superficial do mar



Fonte: Autor

Nos ciclos diurnos de cada estação do período entre junho/2011 e junho/2012 (Figura 4.28), observa-se que os horários dos mínimos e máximos são os mesmos do ciclo diurno anual. Entretanto, ocorreram diferenças significativas entre as amplitudes de cada estação do ano, crescendo entre o inverno ( $\sim 0,1^{\circ}\text{C}$ ), a primavera ( $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ ) e o verão ( $\sim 0,7^{\circ}\text{C}$ ), voltando a diminuir no outono ( $\sim 0,3^{\circ}\text{C}$ ). Essas diferenças provavelmente estão associadas com a diminuição sazonal da radiação incidente, com os ventos, com a dinâmica oceânica e com a cobertura de nuvens (Zhang et.al.,2016).

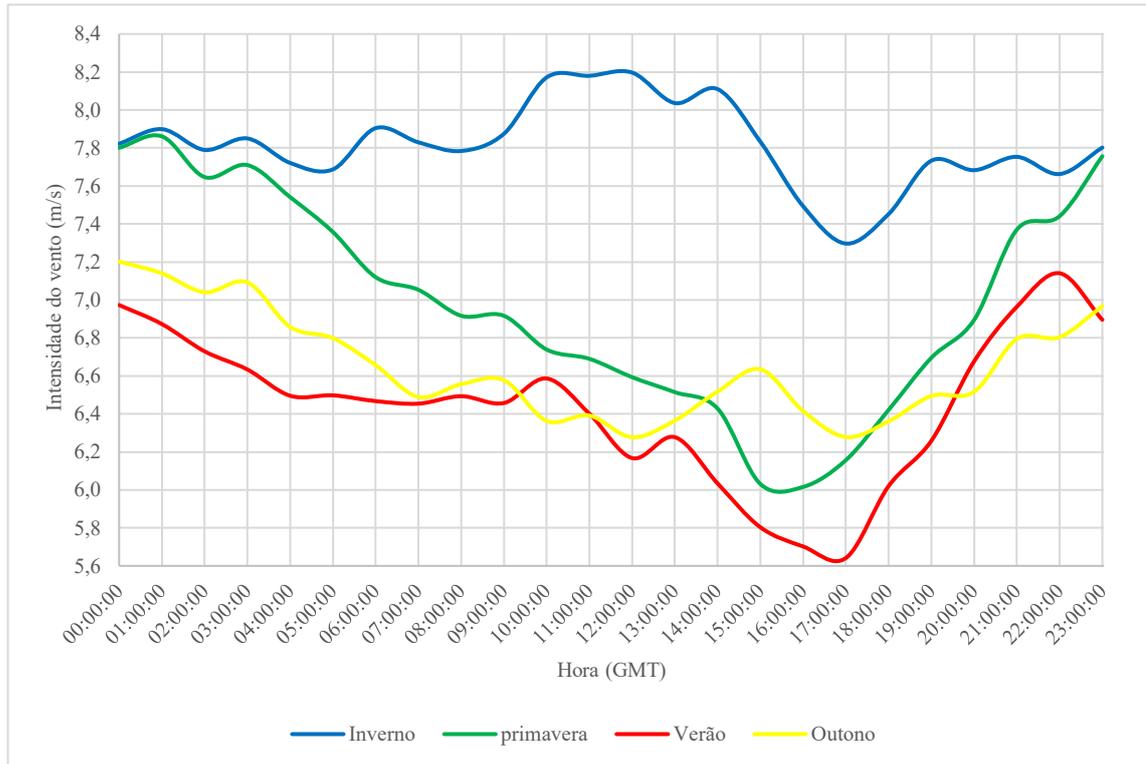
Figura 4.28 - Ciclo Diurno da TSM para cada estação



Fonte: Autor

Os ciclos diurnos de V10M obtidos para cada estação do ano (Figura 4.29) corroboram esse último trabalho (Zhang et.al.,2016), uma vez que as magnitudes do vento são mais intensas no inverno e decrescem para valores mínimos no verão, além de apresentarem valores diários decrescentes sempre entre 12:00 e 17:00, justamente quando a TSM está aumentado até atingir o seu máximo diário às 18:00 (15:00 local).Portanto, provavelmente as maiores velocidades do vento do inverno propiciaram maior mistura turbulenta na interface ar-mar e /ou advecção de calor, ocorrendo o inverso no verão; enquanto diariamente o vento mais fraco esteve associado com as maiores temperaturas diárias em todas as estações.

Figura 4.29 - Ciclo Diurno da intensidade do vento para cada estação

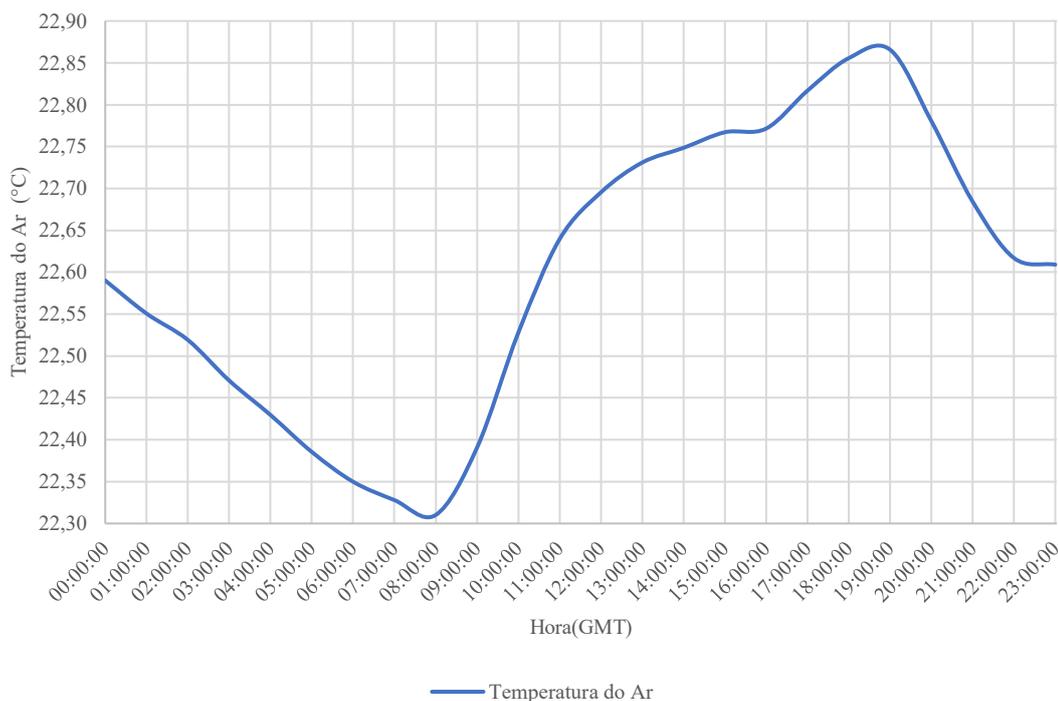


Fonte: Autor

#### 4.2.2 TAR2M

O ciclo diurno anual da TAR2M (Figura 4.30) apresentou uma amplitude térmica de 0,6°C. O ciclo diurno da normal climatológica obtida por Dereczynski (2022) com dados do ERA5 tem uma amplitude térmica de aproximadamente 0,3°C. As TAR2M máximas (22,9°C) foram iguais, enquanto a TAR2M mínima do ciclo ERA5 (22,6°C) está superestimada em relação à do ciclo com os dados da boia (22,3°C), sendo esse o motivo das diferenças entre as amplitudes térmicas. Dereczynski (2022) descreveu que a temperatura do ar tende a ser subestimada pelo ERA5. Poderia, então, no período analisado do presente trabalho ter ocorrido uma anomalia positiva da amplitude térmica, que estaria associada a uma menor cobertura de nuvens de junho/2011 a junho/2012 em relação à climatologia.

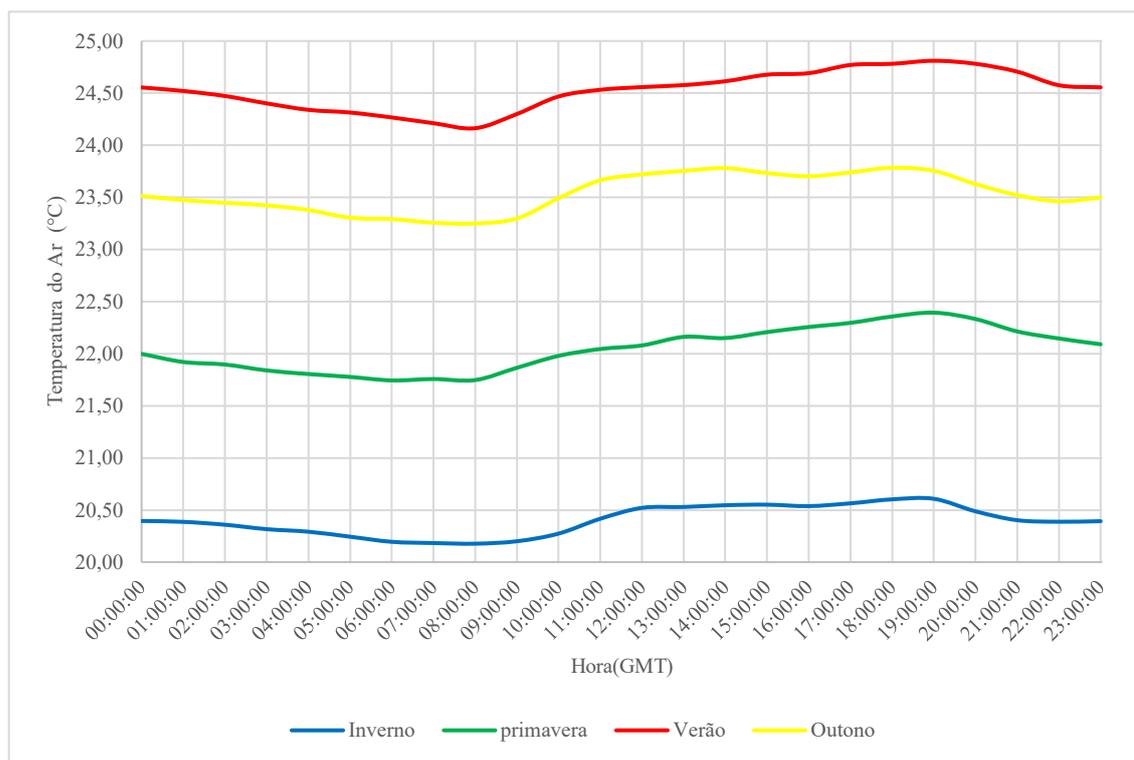
Figura 4.30 - Ciclo Diurno da Temperatura do ar a 2 metros



Fonte: Autor

As amplitudes diurnas por estação foram 0,7°C (Primavera e verão), 0,5°C (Outono) e 0,4°C (Inverno). Com exceção do verão, as amplitudes da TAR2M foram superiores às da TSM (Figura 4.31). De acordo com Dai (2023) o ciclo diurno de temperatura é mais fraco sobre o oceano do que sobre o continente devido à alta capacidade térmica e de mistura do oceano superior, além do grande resfriamento evaporativo sobre o oceano. Leonardo (2010) também associou a menor amplitude térmica diurna da TSM em relação a TAR2M com a maior capacidade térmica do oceano. A TAR2M mínima ocorreu sempre às 8:00 (5:00 local), duas horas antes da ocorrência do menor valor da TSM, provavelmente devido a menor capacidade térmica do ar em relação ao oceano. Por outro lado, a TAR2M máxima ocorreu às 19:00 (16:00 local), uma hora após a maior TSM do dia. Essas defasagens, decorrentes do ciclo diurno da TSM ser menor do que o da TAR2M, também foram obtidas por Leonardo (2010), estudando os ciclos diurnos na região equatorial com dados de boia do projeto PIRATA (*Pilot Research Moored Array In The Tropical Atlantic*).

Figura 4.31 - Ciclo Diurno da temperatura do ar a 2m para cada estação



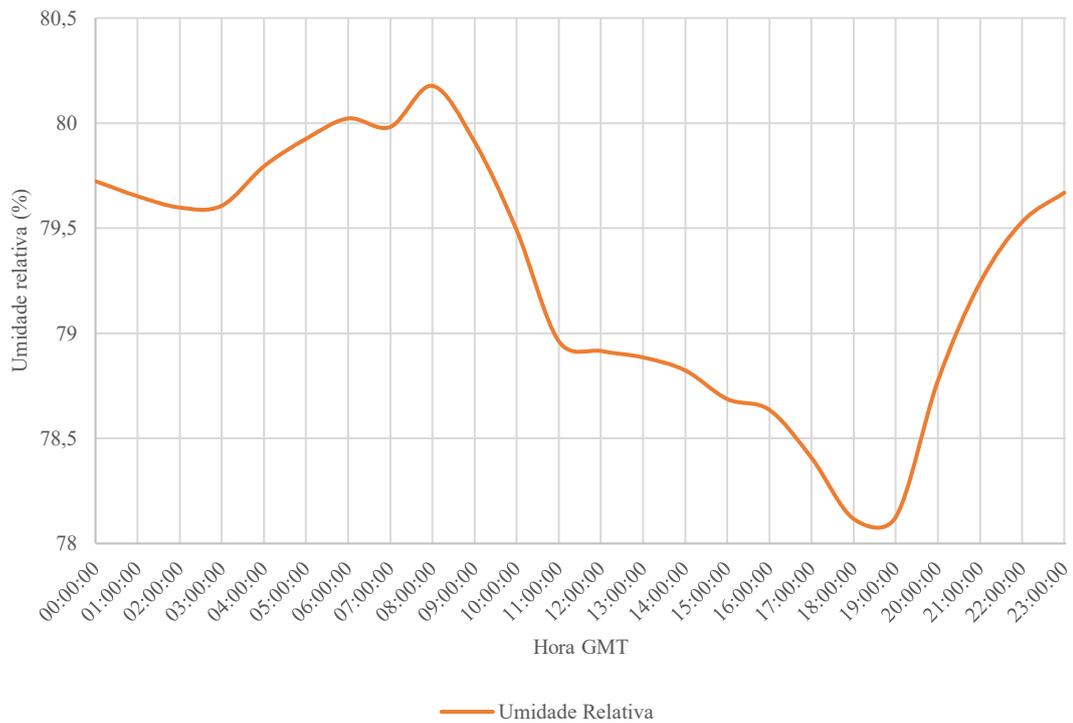
Fonte: Autor

#### 4.2.3 UR2M e q2M

O ciclo diurno anual de UR2M (Figura 4.32) varia inversamente com a TAR2M (Figura 4.34), evidenciando que quando o ar é aquecido a atmosfera retém mais vapor. Essa relação inversa da UR2M com a pressão de vapor de saturação também foi observada por Dereczynski (2022) e Dai (2023), com esse último autor também constatando que a amplitude da umidade relativa do ar sobre a superfície do oceano é bem menor do que sobre o continente.

Os maiores valores de UR2M ocorrem no início do dia, com o valor máximo (80,2%) às 08:00 quando a temperatura é mínima. O valor mínimo (78,1 %) ocorreu às 19:00 concomitantemente com a temperatura máxima. Esses valores são 2% inferiores aos da climatologia Dereczynski (2022), que de acordo com essa autora estão superestimados. Convém lembrar, que Dereczynski (2022) comparou a normal climatológica com os ciclos obtidos também com os dados da boia de Santos do PNBOIA, estando o período analisado no presente trabalho provavelmente inserido na série temporal analisada. Isso porque o trabalho supracitado não informa o comprimento da série utilizada com suas datas de início e fim.

Figura 4.32 - Ciclo Diurno da Umidade relativa a 2 metros

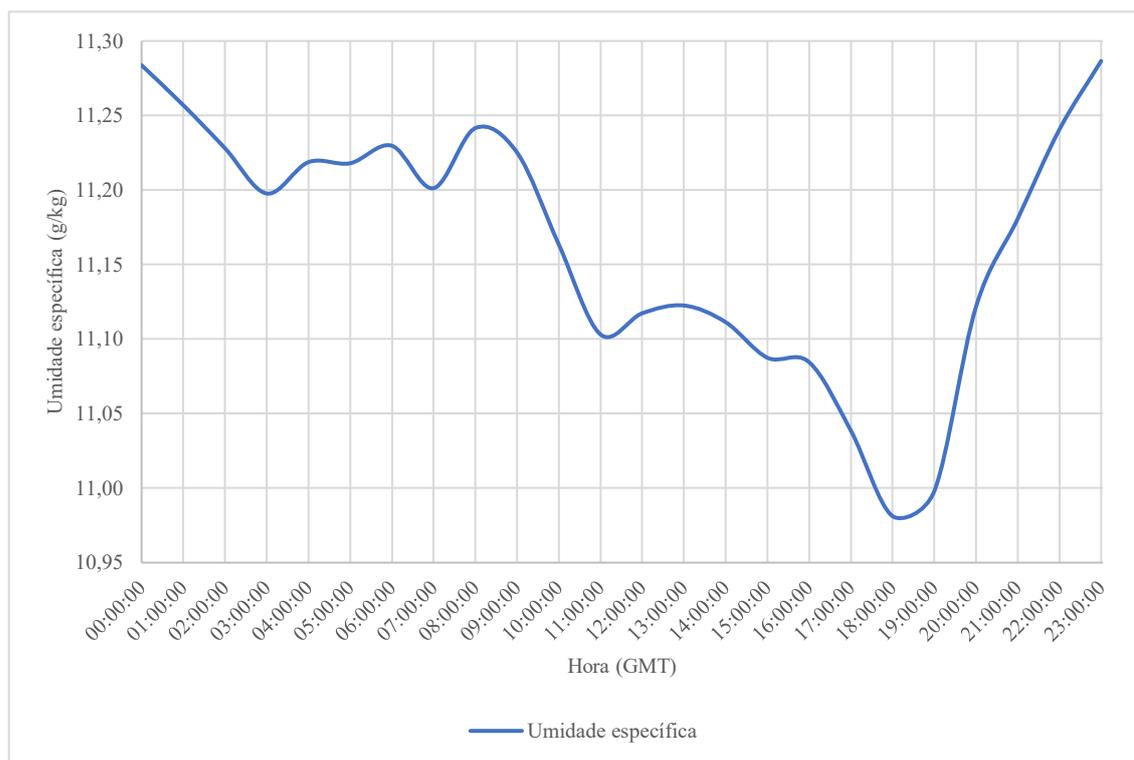


Fonte: Autor

Outra diferença em relação a Dereczynski (2022) é que os horários do máximo e do mínimo de UR2M do presente trabalho ocorreram uma hora após.

A umidade específica (Figura 4.33) tem padrão de variação semelhante ao de UR2M, com um máximo (11,28 g/kg) de q2M às (00:00) e o mínimo (~11 g/kg) às 18:00, tendo ainda um máximo relativo (11,24 g/kg) às 8 h. Esse resultado indica uma variação direta da UR2M com a umidade específica. Ressalta-se que q2M e UR2M tem curvas com a mesma forma, tendo seus valores em fase, como pode ser observado na Figura 4.35. Entretanto, essa influência de q2M sobre a UR2M não é significativa, o que é discutido em seguida.

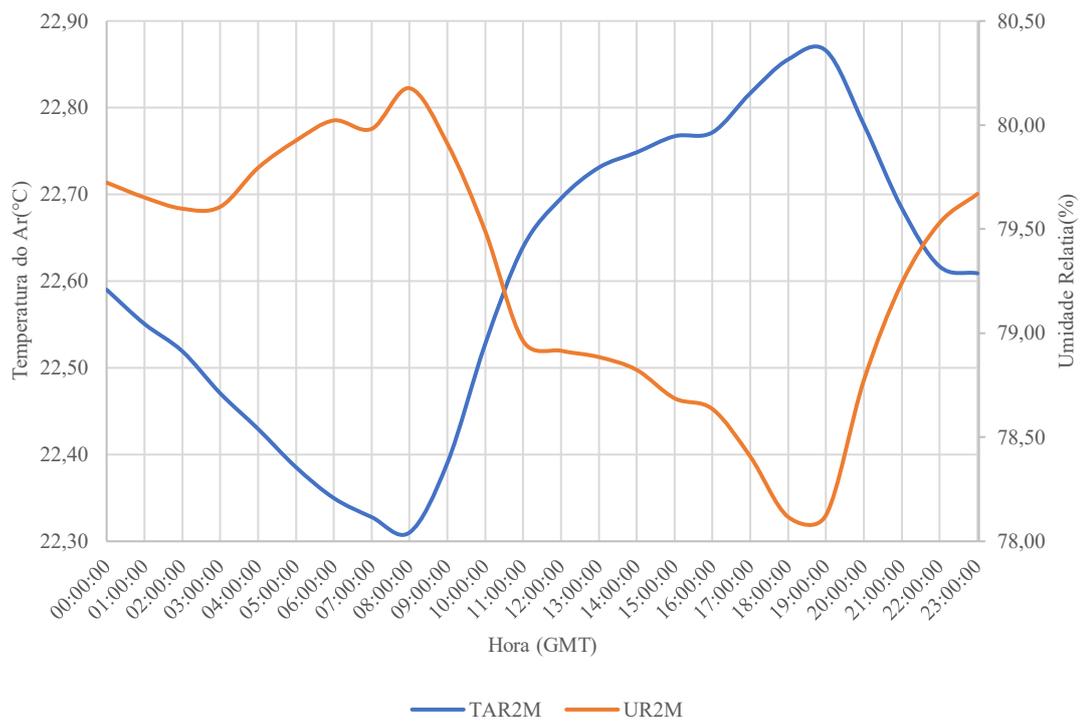
Figura 4.33 - Ciclo Diurno da Umidade específica a 2 metros



Fonte: Autor

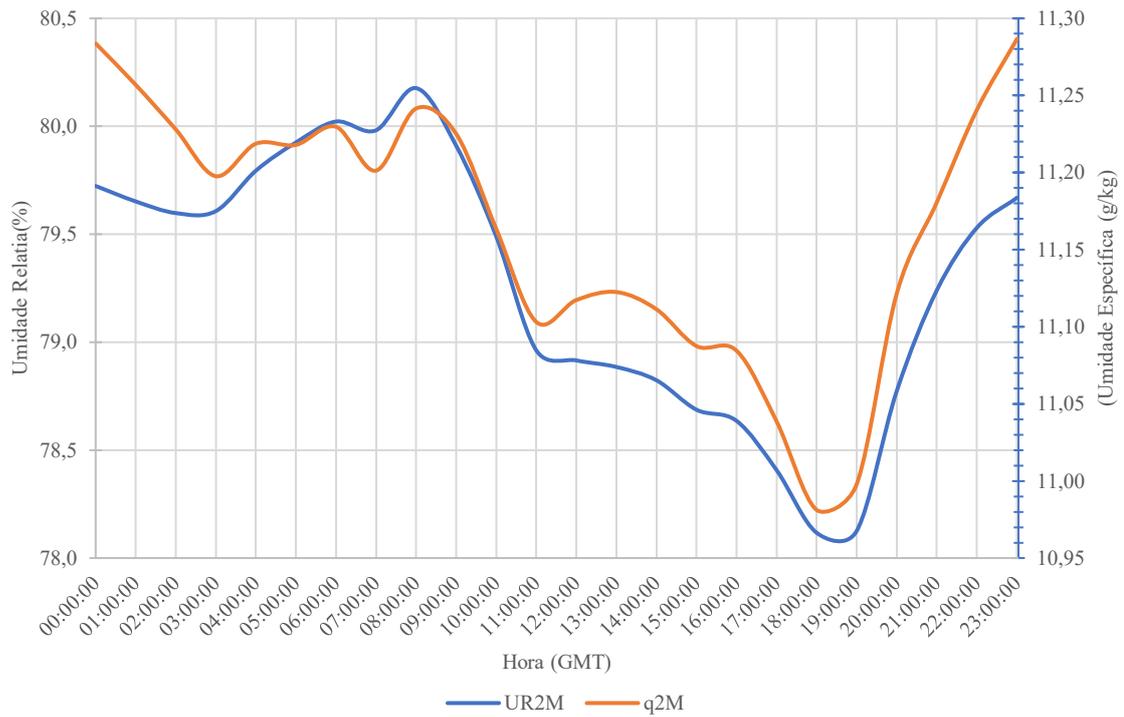
Analisando os espectros de UR2M e q2M (Figuras 4.12 e 4.13) observa-se que UR2M exibe a maior amplitude da banda diurna na frequência de 1 cpd (24h), o que justifica a existência de um máximo e um mínimo diário de UR2M, enquanto q2M não apresenta um pico de amplitude na frequência de 1cpd, o que condiz com a baixa variação diurna da q2M. Verifica-se nitidamente, também, que a UR2M tem maior variância na banda diurna do que a q2M (quadro 4), apresentando o pico máximo de umidade relativa na frequência diurna (1 cpd – 24 h) seguido em grau de importância pela frequência de 3 cpd (8 horas) e de 2 cpd (12 horas). Esse padrão é semelhante ao da TAR2M (Figura 4.1). Por outro lado, a q2M teve uma amplitude muito pequena de 0,1 g/kg na frequência diurna. Assim, sugere-se que no ciclo diurno a influência inversa de TAR2M sobre a UR2M (Figura 4.34) predomina sobre a pequena influência de q2M. Em virtude dessa conclusão, convém explicar que a umidade específica é um valor bem próximo da razão de mistura, já que a UR2M é o quociente entre a razão de mistura e a razão de mistura de saturação, multiplicado por 100 (YNOUE, et al., 2017).

Figura 4.34 - Ciclo Diurno da TAR2M x UR2M



Fonte: Autor

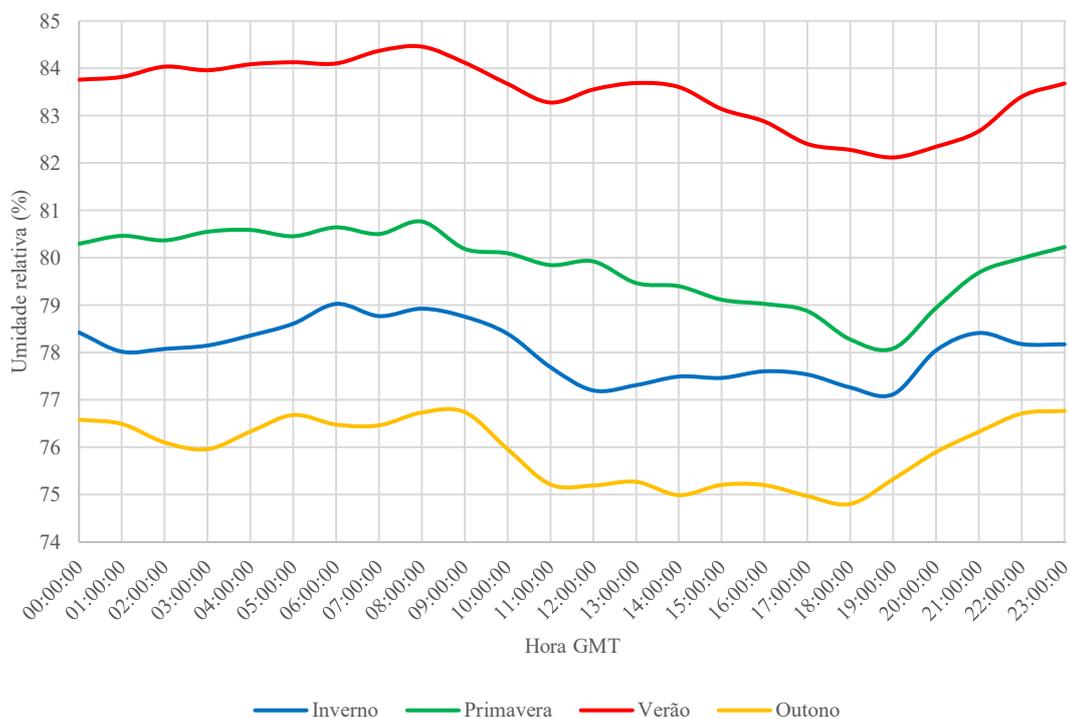
Figura 4.35 - Ciclo Diurno da UR2M x q2M



Fonte: Autor

Os ciclos diurnos de UR2M conforme as estações do ano (Figura 4.36) apresentam a mesma relação inversa do ciclo diurno com a TAR2M. Entretanto, os valores absolutos ao longo dos ciclos são mínimos e próximos no inverno (77-79%) e outono (74-76%), intermediários na primavera (78-80%) e máximos no verão (82-84%).

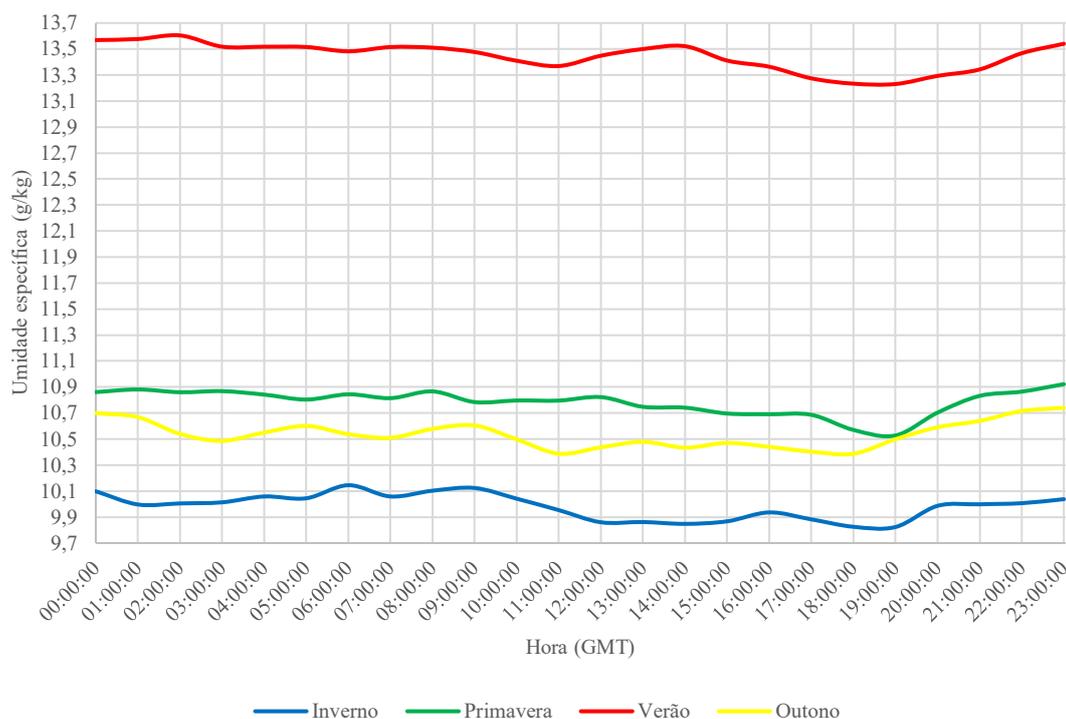
Figura 4.36 - Ciclo Diurno da UR2M para cada estação



Fonte: Autor

Uma vez que o aumento da temperatura faz a pressão de vapor de saturação também aumentar, o que diminuiria a UR2M, então essa propriedade tem ciclos com valores crescentes entre o inverno e o verão porque o conteúdo de vapor aumenta do inverno para o verão, como pode ser visto nitidamente nos ciclos diurnos de q2M (Figura 4.37). Portanto, o ar na região ao largo de Santos, sobre a corrente do Brasil, é mais úmido no verão (~ 14 g/kg), ficando mais seco nas demais estações (entre 9,7 e 10,9 g/kg)

Figura 4.37 - Ciclo Diurno da q2M para cada estação

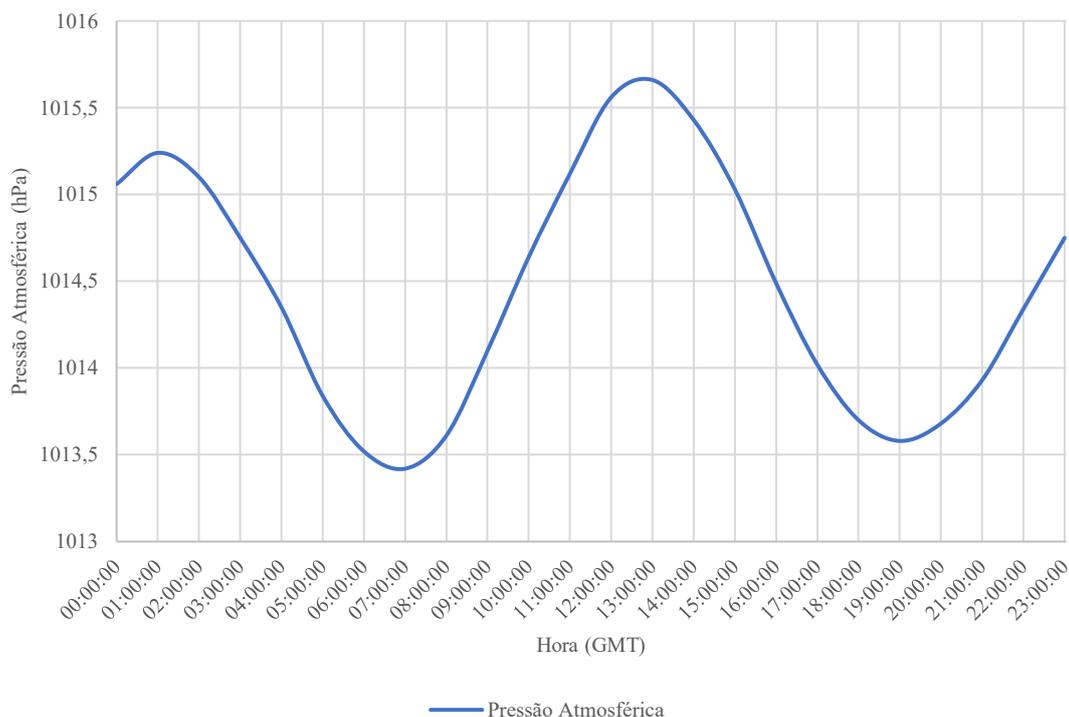


Fonte: Autor

#### 4.2.4 PNMM

O ciclo diurno anual da PNMM (Figura 4.38) é marcado pela maré barométrica com dois mínimos e dois máximos diários, caracterizando um período de 12 h, tendo amplitudes de 2 a 2,2 hPa. Os mínimos ocorreram às 07:00 e 19:00 (4h e 16 h local) e os máximos às 01:00 e 13:00 (22 h e 10 h local). Esses horários coincidem exatamente com os da climatologia de Dereczynski (2022), enquanto os valores absolutos são cerca de 1hPa inferiores. Segundo essa autora os dados de PNMM do ERA5 estão superestimados. Por outro lado, as amplitudes do presente trabalho foram aproximadamente iguais às climatológicas.

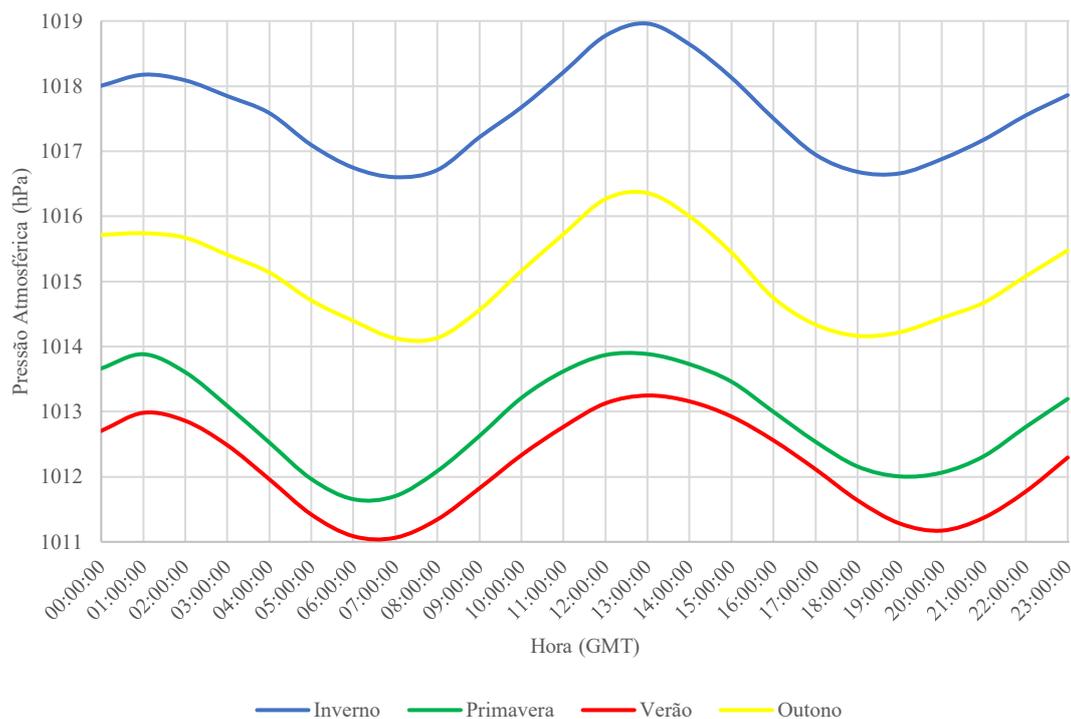
Figura 4.38 - Ciclo Diurno da Pressão atmosférica ao nível médio do mar



Fonte: Autor

Além disso, o mínimo de 19:00 foi um pouco maior que o das 07:00, ao contrário da climatologia supracitada. Analisando os ciclos diurnos para cada estação do ano (Figura 4.39) conclui-se que as pressões diárias são maiores no inverno e diminuem até o verão, voltando a aumentar no outono. Entretanto, as amplitudes diárias são praticamente iguais em todas as estações. O mínimo diário ocorre sempre às 07 h, contrastando com o climatológico que ocorre às 19 h.

Figura 4.39 - Ciclo Diurno da PNMM para cada estação

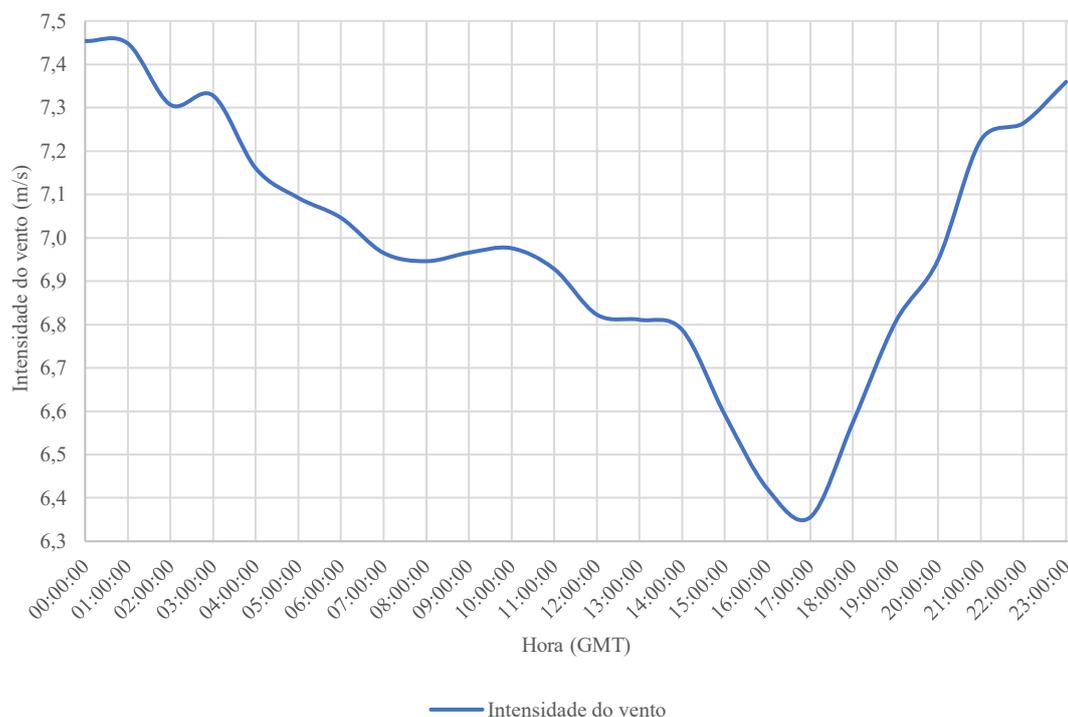


Fonte: Autor

#### 4.2.5 V10M

A V10M (Figura 4.40) máxima ( $\sim 7,5$  m/s) ocorre às 00:00 (22 h local), enquanto a mínima ( $\sim 6,4$  m/s) ocorre às 17 h (14 h local). Esses horários são conformes a normal climatológica de Dereczynski (2022), cuja amplitude teve valores aproximadamente 1 m/s menores. De acordo com Dereczynski, (2022) o ERA5 subestima em 2m/s a velocidade do vento na bacia de Santos, de modo que pode ter ocorrido uma anomalia positiva das velocidades do vento.

Figura 4.40 - Ciclo Diurno do Vento a 10 metros



Fonte: Autor

Observando-se os ciclos de cada estação do ano (Figura 4.29), ressalta-se que no inverno, contrariamente às demais estações, o máximo não ocorre a noite, às 01:00 (23 h local), mas sim durante o dia às 12:00 (9 h local). Os valores de V10M ao longo do ciclo foram decrescentes do inverno para o verão, voltando a aumentar no outono. A amplitude máxima (1,8 m/s) de V10M ocorreu na primavera, sendo mínimas (0,9 m/s) no inverno, quando os ventos foram mais intensos (7,3 – 8,2 m/s), e no outono (0,9 m/s) quando se assemelhou com a normal climatológica.

No espectro de amplitude da intensidade do vento (Figura 4.22) vê-se que a maior frequência na banda diurna é a de 1 cpd (24 h), indicando a ocorrência de um máximo e um mínimo diário de V10M conforme o ciclo diurno apresenta.

#### 4.2.6 Fluxos de calor latente e Calor sensível

O ciclo diurno de LH (Figura 4.41) apresenta uma perda de calor crescente à medida que a velocidade do vento aumenta (Figura 4.40). Um olhar sobre o ciclo diurno de  $q_2M$  (Figura 4.33) pode auxiliar na discussão da variação de LH. Vê-se que nas 8 primeiras horas do dia

q2M não chegou a variar 0,1 g/kg, quando também LH varia muito pouco. Depois, até 12:00, LH tem um aumento mais significativo (fica menos negativo), ocorrendo também a maior queda de q2M, que continua diminuindo em menor taxa até às 18:00 quando atinge o valor mínimo. Entre 19:00 e 23:00 quando a TAR2M (Figura 4.30) diminui, q2M aumenta provavelmente devido a maior perda de calor nesse período (LH fica mais negativo) com consequente evaporação. Esse cenário é sugestivo de uma dependência do ciclo diurno de LH da variação da magnitude do vento. Durante a madrugada e o início da manhã (00:00 às 12:00) a evaporação diminui (LH fica menos negativo), aumentando na segunda metade do dia (LH mais negativo), especialmente entre às 17:00 e 23:00 quando o vento também aumenta (Figura 4.40).

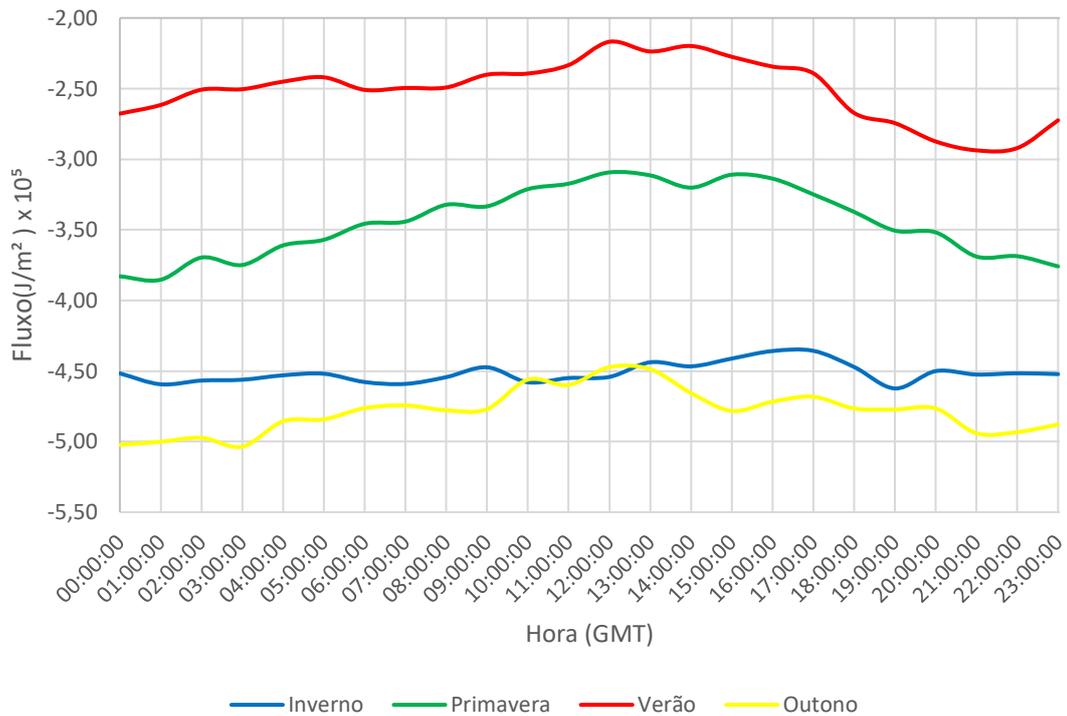
Figura 4.41 - Ciclo Diurno do Fluxo de calor latente



Fonte: Autor

Analisados os Ciclos para cada estação (Figura 4.42) foi observado que os maiores valores de LH ocorreram no ciclo de inverno, quando estiveram entre  $-5,0 \times 10^5$  e  $-4,5 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup>. No ciclo de inverno, os valores variaram pouco em torno de  $-4,5 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup>. Na primavera ( $-4,0 \times 10^5$  e  $-3,0 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup>) e no verão ( $-3,0 \times 10^5$  e  $-2,0 \times 10^5$  J/m<sup>2</sup>), apesar dos fluxos serem menores, as amplitudes diárias foram maiores. Esse último fato é devido às maiores amplitudes diárias do vento ocorrerem também na primavera e no verão.

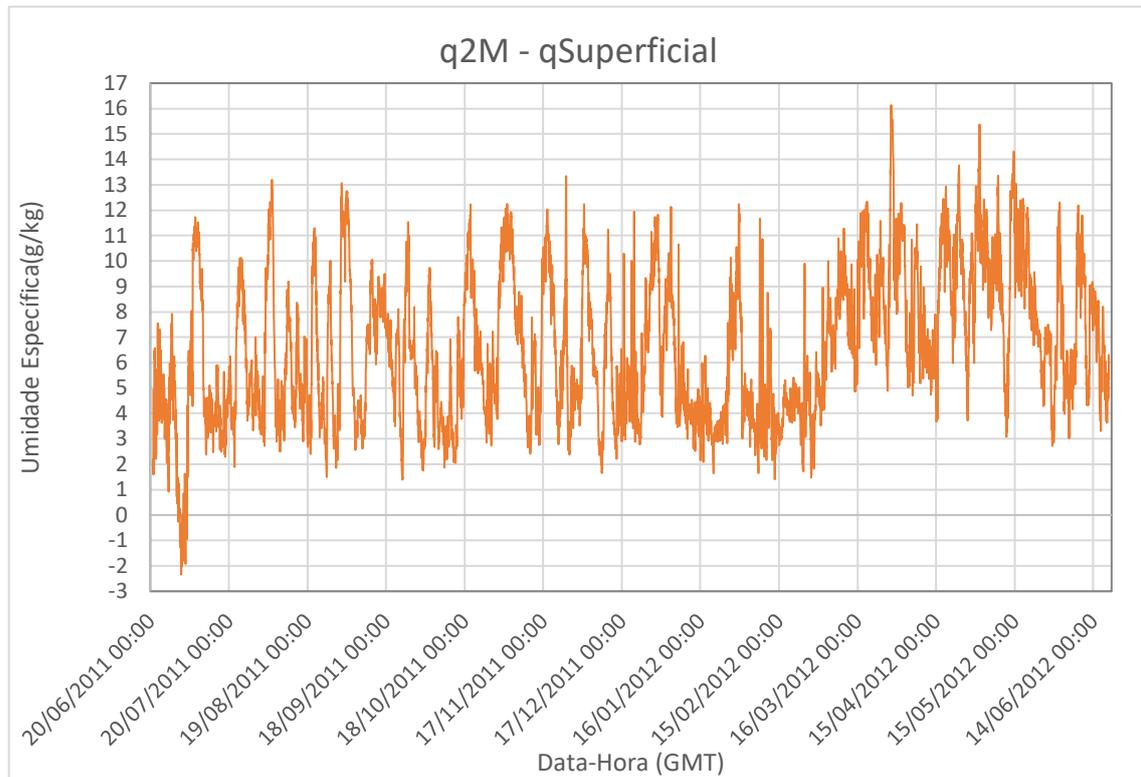
Figura 4.42 - Ciclo Diurno do Fluxo de calor latente para cada estação



Fonte: Autor

Já os maiores valores dos ciclos de inverno e outono são tanto devidos às velocidades do vento mais intensas nessas estações quanto às maiores diferenças entre a umidade superficial e  $q_2M$  (Figura 4.43). Nessa figura observa-se que as maiores diferenças de umidade específica ocorrem no inverno e no outono.

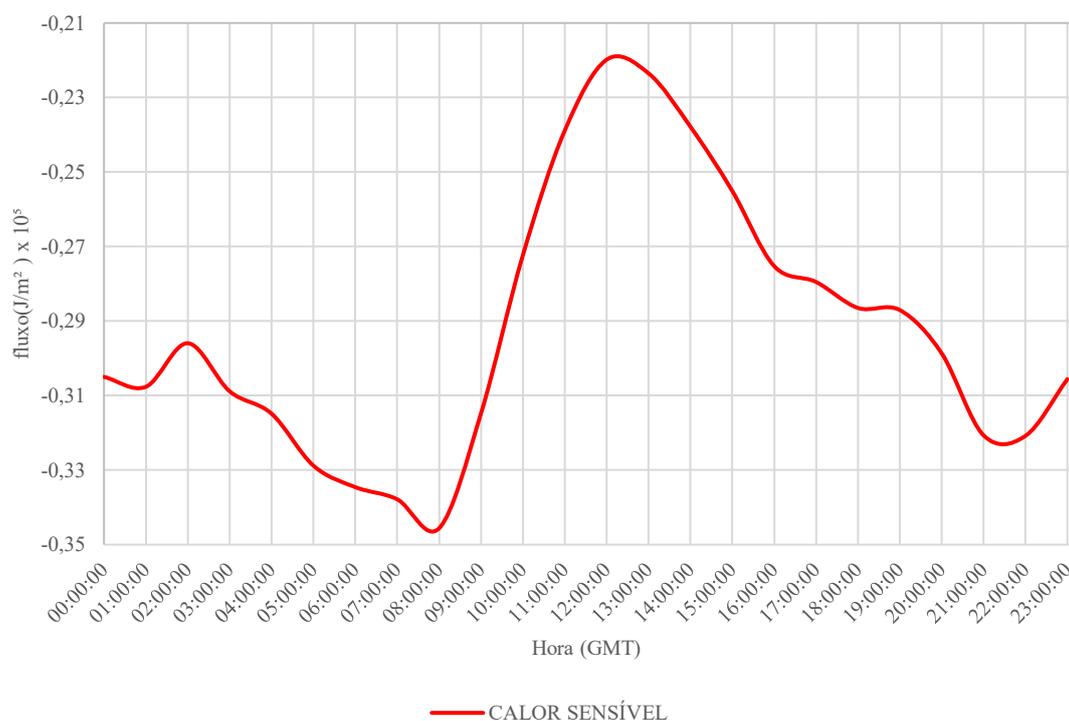
Figura 4.43 - Diferença entre q2M e umidade específica superficial



Fonte: Autor

O padrão de variação de SH (Figura 4.44) é semelhante ao de LH, isto é, ocorre maior perda de calor (fluxos mais negativos) no fim de tarde/noite (19:00 às 23:00) e ao longo da madrugada/amanhecer (00:00 às 08:00) justamente quando V10M tem maiores valores.

Figura 4.44 - Ciclo Diurno do Fluxo de calor Sensível



Fonte: Autor

Portanto, os fluxos de calor sensível e latente ao longo do ciclo diurno têm variação direta com V10M, isto é, ocorrendo maior perda de calor quando as velocidades do vento são maiores. Pode-se dizer que desde o final da tarde até o amanhecer ocorre resfriamento da superfície do oceano, com maior evaporação nesse período também.

### 4.3 Variabilidade Sinótica

A banda sinótica é representada principalmente pela resposta da água e do ar à passagem das frentes frias. Esses sistemas passam sobre a plataforma continental com uma periodicidade que não é constante, porém existem climatologias da quantidade de frentes que passam por ano na região da BS. De acordo com Andrade (2005) ocorrem 56 frentes por ano (~4,7 frentes por mês) na área da BS. Já Dereczynski (2023) estabeleceu uma normal climatológica da quantidade de frentes frias, segundo a qual ocorrem 49,2 frentes por ano (~4,1 frentes por mês). Essa última autora ainda contabilizou 45 frentes (~3,8 por mês) em 2011 e 43 (~3,6 por mês) em 2012. Considerando esses trabalhos e admitindo que houvesse uma periodicidade do intervalo de tempo entre a passagem de dois sistemas frontais consecutivos, então o intervalo

de tempo entre duas passagens consecutivas de uma frente fria pela BS seria de cerca 7,5 dias. No presente trabalho utilizando-se as cartas sinóticas do CHM para o período de junho/2011 a junho/2012, foram contabilizadas a quantidade de frentes que passaram pela BS. Considerando o local da boia do PNBOIA na área Charlie (C), obteve-se um total de 48 frentes (em média 4 frentes por mês também). Em 8 desses meses o total de frentes mensais foi de 4, com as exceções ocorrendo em agosto/2011 (6), outubro/2011 (5), novembro/2011 (3) e fevereiro/2012 (2). Além disso foram calculados os intervalos de tempo entre as passagens de cada frente fria, obtendo-se os seguintes valores com as frequências entre parênteses: 2,5 d (0,4 cpd) , 3 d (0,33 cpd) , 4 d (0,25 cpd), 4,5 d (0,22 cpd) , 5 d (0,2 cpd) , 5,5 d (0,18 cpd) , 6 d (0,17 cpd), 6,5 d (0,15 cpd) , 7 d (0,14 cpd), 7,5 d (0,133 cpd), 8 d (0,125 cpd), 8,5 d (0,117 cpd) , 11,5 d (0,087 cpd) , 12,5 d (0,08 cpd) , 13 d (0,076 cpd), 16,5 d (0,06 cpd) , 17 d (0,058 cpd) e 22,5 d (0,044 cpd). Os principais picos observados na banda sinótica do espectro de cada propriedade oceanográfica, têm períodos (frequências) muito próximos desses valores, o que justifica identificar os períodos mais energéticos utilizando o espectro de amplitude ou de densidade espectral.

Foram analisadas as variações das propriedades meteoceanográficas durante 2 das frentes frias mais intensas dentre as 48 que passaram pela BS dentro dos seguintes períodos: 01/07/2011 até 08/07/2011 e 01/08/2011 até 06/08/2011. Os títulos das seguintes seções referem-se a data e a hora em que a frente passou aproximadamente pelo local da boia na área Charlie (C).

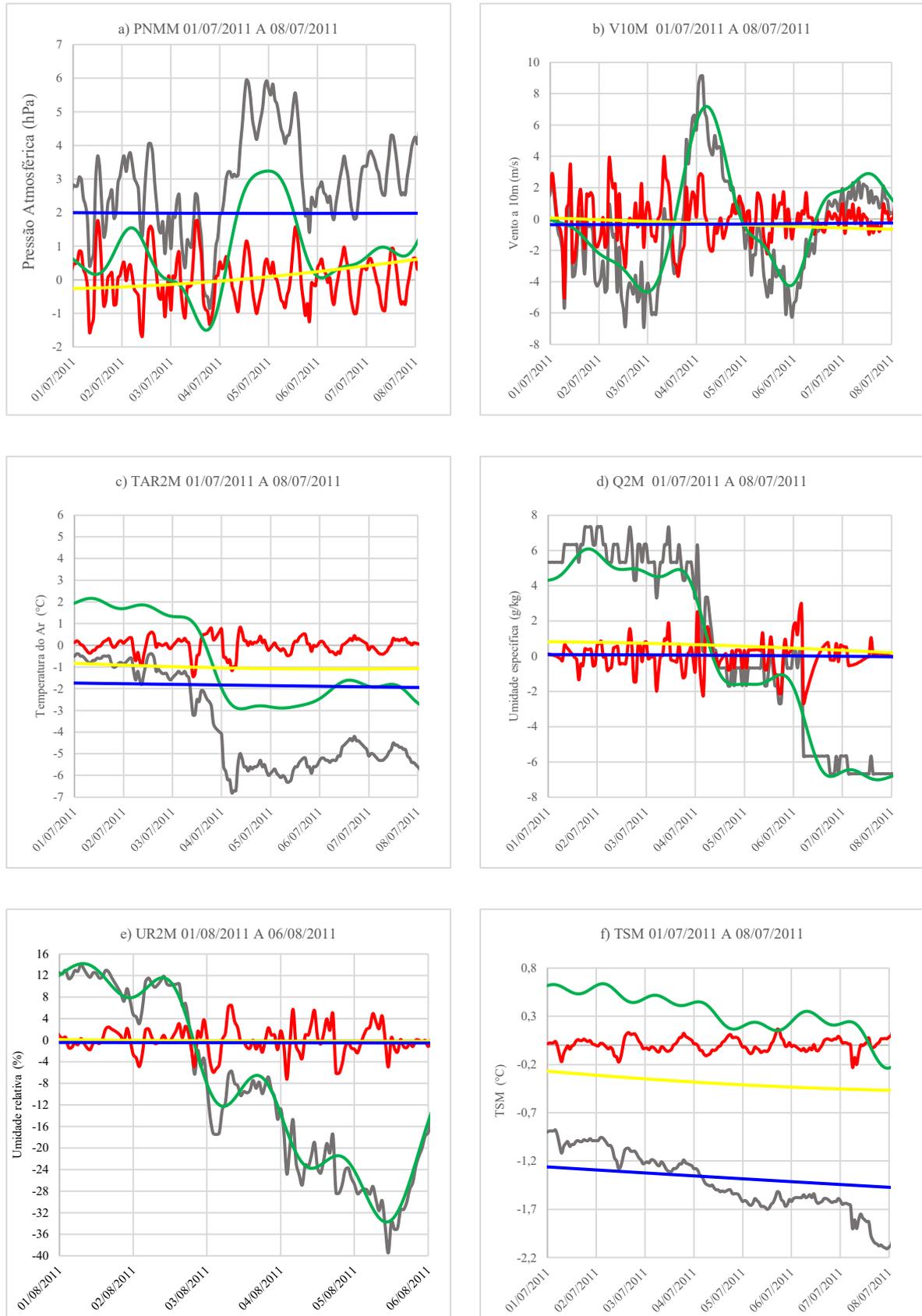
#### **4.3.1 Frente Fria de 03/07/11 às 00h**

Na Figura 4.45 estão apresentadas as séries temporais de anomalias de PNMM, TAR2M, q2M, UR2M, V10M, TSM, SH e LH, em relação a média anual, durante o período de 01/07/2011 até 08/07/2011, contendo as curvas relativas à cada uma das bandas de frequência que está sendo estudada nesse trabalho. É notável, para todas as variáveis, a dominância do sinal sinótico sobreposto ao ciclo diurno, enquanto as contribuições sazonais e intrasazonais não oscilam. Sendo assim, a utilização dos termos relativos às variações das propriedades, a não ser que haja alguma especificação, são relativos à componente sinótica.

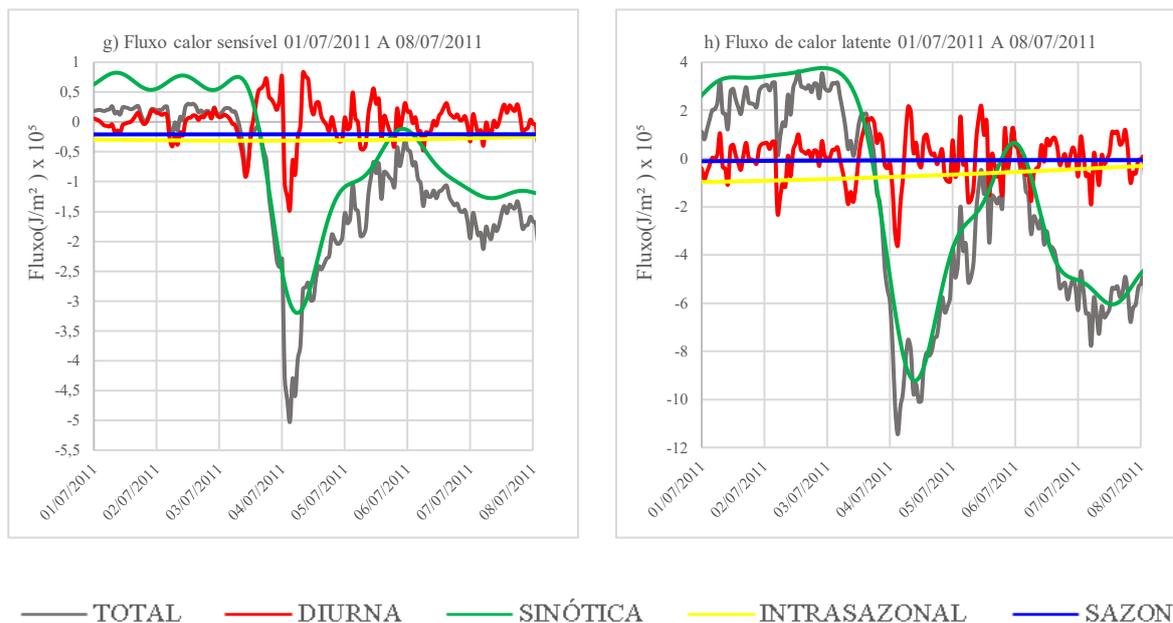
A frente fria passou pela boia de Santos aproximadamente no dia 03/07/2011 (Figura 4.45 – frente fria passando pela área C), podendo-se ver um cenário pré-frontal com a PNMM (Figura 4.45a) diminuindo 3 hPa entre a madrugada do dia 02 até as 18 h do dia 03, quando

também na maior parte desse tempo, até as 00:00 do dia 03 a magnitude do vento (Figura 4.45b) apresentou anomalias negativas de até 3 m/s, indicando um enfraquecimento do vento. Não houve um aquecimento pré-frontal do ar como costuma ocorrer sobre o continente, mas sim uma diminuição de 1°C da TAR2M (Figura 4.45c). No período pós frontal, após 18:00 de 03/07, a PNMM aumenta aproximadamente 2,7 hPa até 04/07 às 06:00 simultaneamente com uma queda de TAR2M igual a 2,5°C, conforme esperado durante a passagem de uma frente fria. Ressalta-se que, até 05/07 às 00:00 a PNMM continua aumentando (+ 2hPa), enquanto TAR2M praticamente não varia. No mesmo período em que PNMM aumentou e TAR2M diminuiu, a q2M (Figura 4.45d) e a UR2M (Figura 4.45e) diminuíram respectivamente 7 g/kg e 30%, o que está associado com o ar mais frio e seco da alta migratória localizada na retaguarda do sistema frontal (Dereczynski,2023) e que se desloca passando pela boia. Ressalta-se ainda, que na variação da umidade relativa, a diminuição do conteúdo de vapor predomina sobre a diminuição da temperatura. A V10M aumentou 11,5 m/s nesse período pré-frontal até 04/07 às 06:00. Nesse período pós-frontal as perdas de LH e SH (Figura 4.45g e 4.45h) foram intensificadas bruscamente variando respectivamente entre -1 e -15 J/m<sup>2</sup> e entre 0 e -5 J/m<sup>2</sup>, perfazendo uma perda total de até -20 J/m<sup>2</sup> logo após as 00:00 de 04/07. Esses fluxos intensos foram impostos pelos gradientes verticais de umidade específica e de temperatura e os ventos mais intensos do período pós frontal. Entre os dias 06/07 e 08/07 apesar do vento diminuir de intensidade, o fluxo de calor latente diminuiu novamente por causa de q2M atingir anomalias de -7 g/kg. Como houve uma diminuição de 0,4°C na TSM (Figura 4.45f) no dia 04/07 entre 00:00 e 18:00, então formulou-se as seguintes hipóteses para esse fato: i) a intensa perda de calor latente e sensível contribuiu para essa diminuição. Cardoso & Dourado (2014) verificaram uma diminuição de 0,2°C na TSM, na região da Confluência Brasil-Malvinas durante a passagem de uma frente fria; ii) o aumento da velocidade do vento implicou em maior mistura turbulenta na camada superficial do oceano, o que também pode ter contribuído para a diminuição da TSM. Esse efeito da mistura turbulenta na camada de mistura foi relatado por Dourado & Oliveira (2001) na região de Cabo Frio e por Cardoso & Dourado (2014) na Confluência Brasil-Malvinas. Portanto, a TSM respondeu à passagem da frente fria, diminuindo 0,4°C após cerca de 1 dia. Vê-se ainda, que a curva de anomalias de TSM total, de 01/07 a 08/7, tem a mesma forma da curva das anomalias diurnas, exceto no período em que diminuiu provavelmente por causa da mistura turbulenta, quando teve inclinação contrária à da curva diurna.

Figura 4.45 - Reconstrução dos sinais frente fria 03/07/2011



Continuação da Figura 4.45 - Reconstrução dos sinais frente fria 03/07/2011



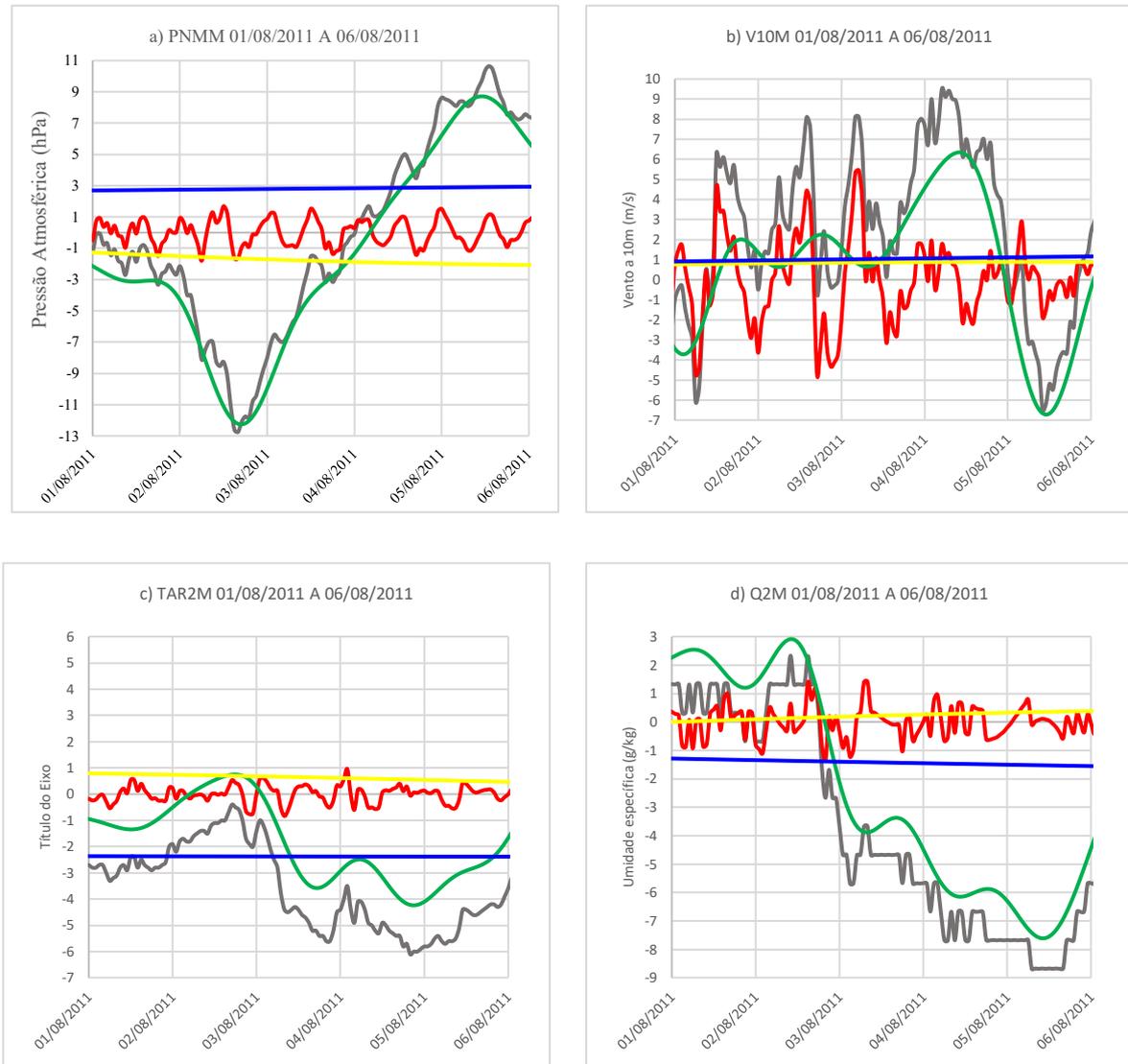
Fonte: Autor

#### 4.3.2 Frente Fria de 02/08 às 18h

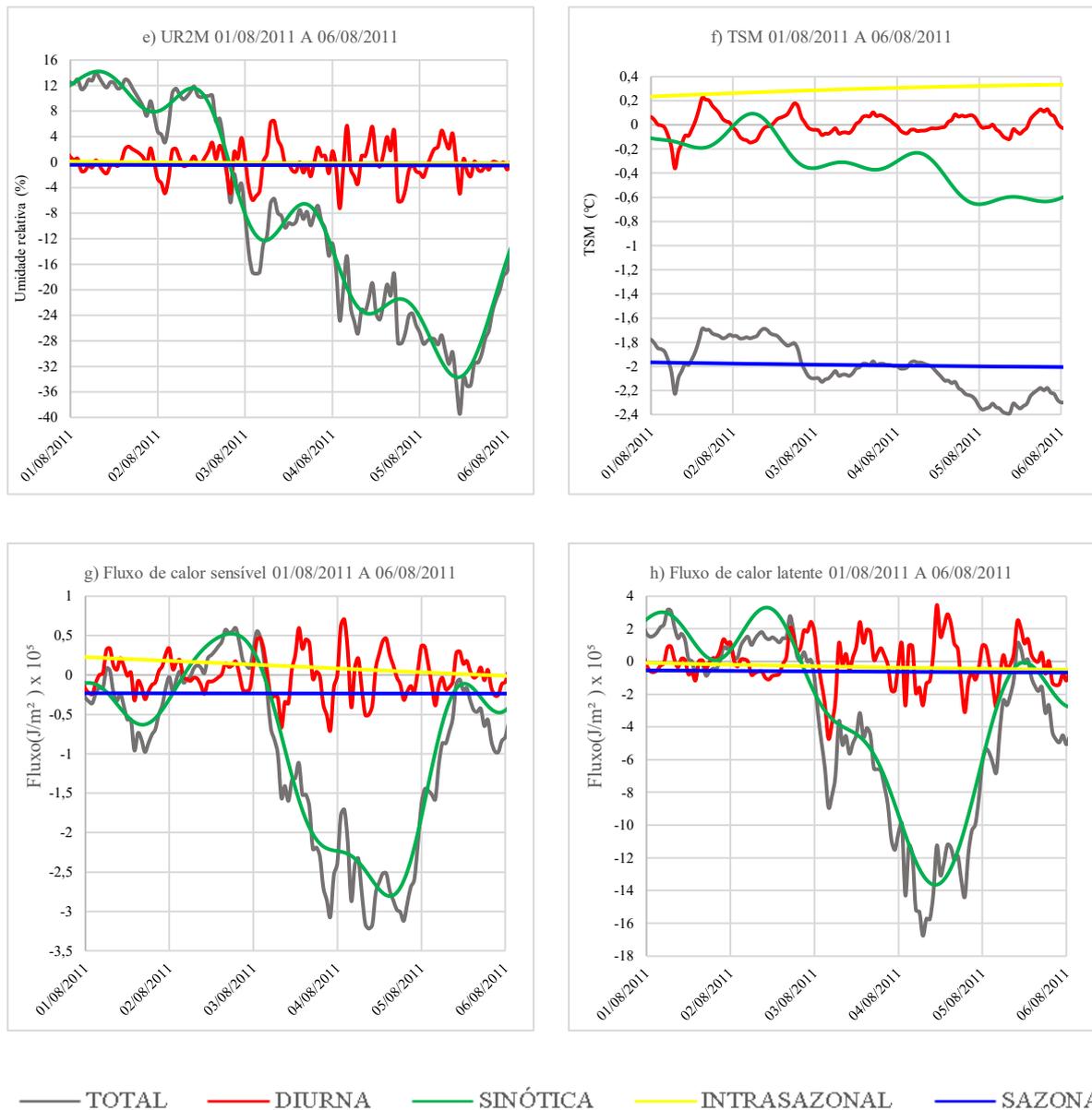
O modo como as propriedades meteocanográficas variaram nos períodos pré e pós frontal, apresentou algumas características similares da frente apresentada na seção anterior (Figura 4.46), com exceção dos seguintes aspectos: houve um aquecimento pré-frontal da TAR2M,  $\sim 2^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.46c), em 1 dia, entre 01/08 às 18:00 e 02/08 às 18:00, conforme esperado (YNOUE, *et al.*, 2017); a PNMM (Figura 4.46a) teve tanto as anomalias negativas pré-frontais ( $-9$  hPa) quanto as anomalias positivas pós-frontais ( $+ 21$ hPa) muito superiores às da frente de julho, indicando que essa frente apresentou um maior gradiente de pressão atmosférica. as anomalias positivas pós frontais de V10M (Figura 4.46b), de até  $6$  m/s, foram inferiores às da frente de julho ( $11,5$  m/s); nesse período de crescimento da intensidade do vento q2M (Figura 4.46d) atingiu a maior anomalia negativa ( $- 7$  g/kg), implicando na máxima perda de LH ( $-18$  J/m<sup>2</sup>) e de SH ( $\sim -3$  J/m<sup>2</sup>) (Figura 4.46g) e perfazendo uma perda total de  $-21$  J/m<sup>2</sup>; também houve um aumento da TSM (Figura 4.46f) de  $0,3^{\circ}\text{C}$  no período pré-frontal, entre 01/08 às 18:00 e 02/08 às 06:00 concomitante com uma diminuição das perdas por SH e LH, ao ponto de SH tornar-se positivo entre por aproximadamente 6 horas, implicando em ganho de calor pelo oceano. Considerando que esse aumento se deu entre o fim de tarde e a madrugada, então sugere-se que, combinado com a diminuição das perdas de LH e pequeno ganho de SH, pode

ter havido uma influência da cobertura de nuvens, invertendo o sinal da perda radiativa em ondas longas que passa a ser positivo por conta de calor retido na atmosfera.

Figura 4.46 - Reconstrução Sinais Frente fria 02/08/2011



Continuação da Figura 4.46 Reconstrução Sinais Frente fria 02/08/2011



Fonte: Autor

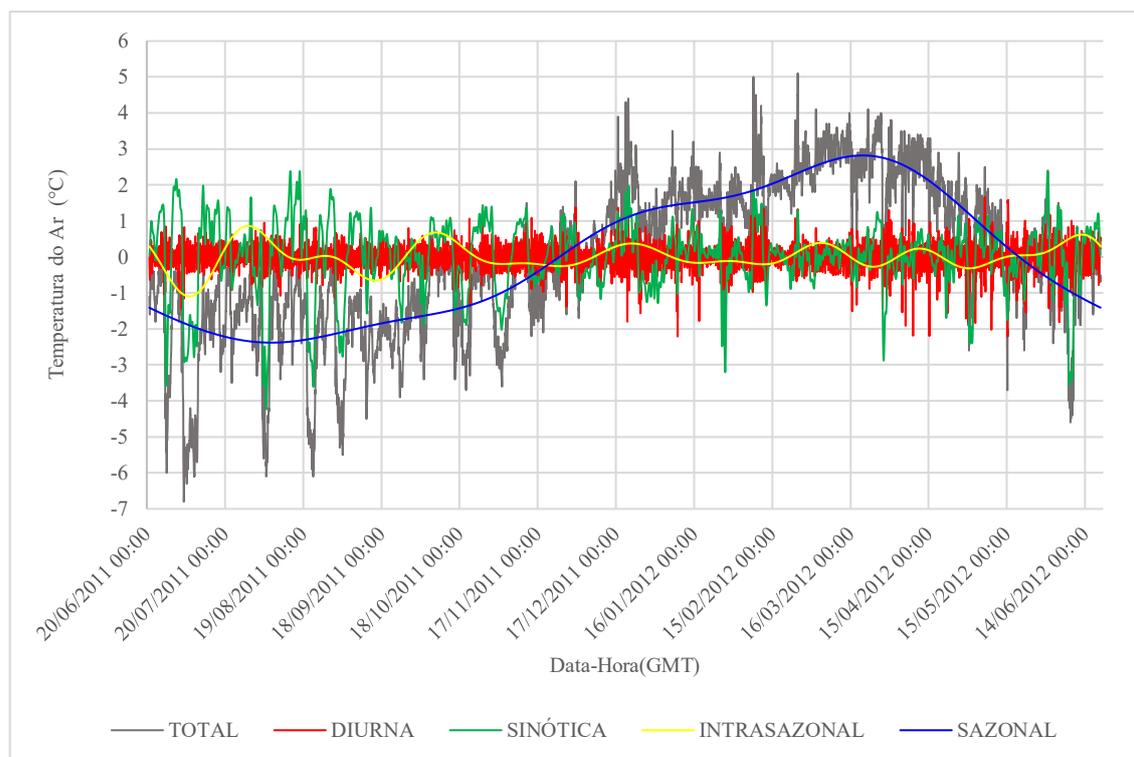
#### 4.4 Variabilidade Sazonal

A análise sazonal foi feita considerando a reconstituição da série para a banda sazonal, que compreende as frequências associadas aos períodos de 90 dias a 365 dias.

#### 4.4.1 TAR2M

As anomalias sazonais da TAR2M estão apresentadas na Figura 4.47. A amplitude térmica da banda sazonal foi de  $5,2^{\circ}\text{C}$ , sendo resultado principalmente da variação sazonal da radiação solar associada com a translação da terra em torno do sol (Ivany & Judd, 2022). Observa-se que a variação sazonal ficou bem aproximada por uma senoide com período de 1 ano, conforme descrito por Ivany & Juddy (2022). Essas autoras afirmam que essa variação é consistente com a variação da insolação. No espectro de amplitude da TAR2M pode-se ver que a componente anual é a mais relevante, contribuindo com uma amplitude de  $2,44^{\circ}\text{C}$ , seguida pela semestral ( $0,23^{\circ}\text{C}$ ) e trimestral ( $0,17^{\circ}\text{C}$ ). Conclui-se que a escolha das frequências entre 90 d e 265 d para representarem a banda sazonal foi adequada, uma vez que essas frequências juntas reproduziram a variação senoidal com período de 1 ano. A variância da banda sazonal representou 72% da variância total, o que justifica a sobreposição da curva sazonal sobre as demais bandas.

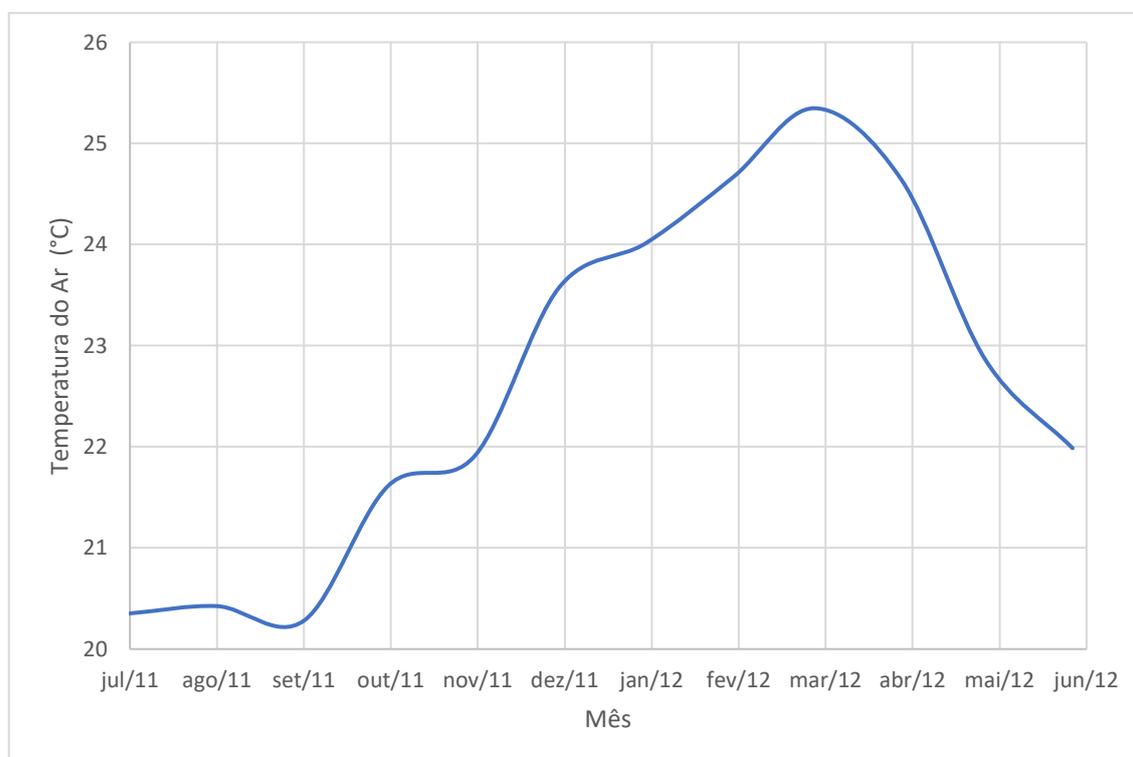
Figura 4.47 - Anomalia de TAR2M para cada escala de estudo



Fonte: Autor

No ciclo anual de TAR2M (Figura 4.48) vê-se que as temperaturas máximas ( $25,3^{\circ}\text{C}$ ) e mínima ( $20,2^{\circ}\text{C}$ ) ocorreram respectivamente em março e setembro. Em relação ao ciclo anual climatológico de Dereczynski (2023), o máximo está  $0,5^{\circ}\text{C}$  inferior e o mínimo é  $0,2^{\circ}\text{C}$  superior, ambos defasados de um mês para a frente.

Figura 4.48 - Ciclo anual TAR2M

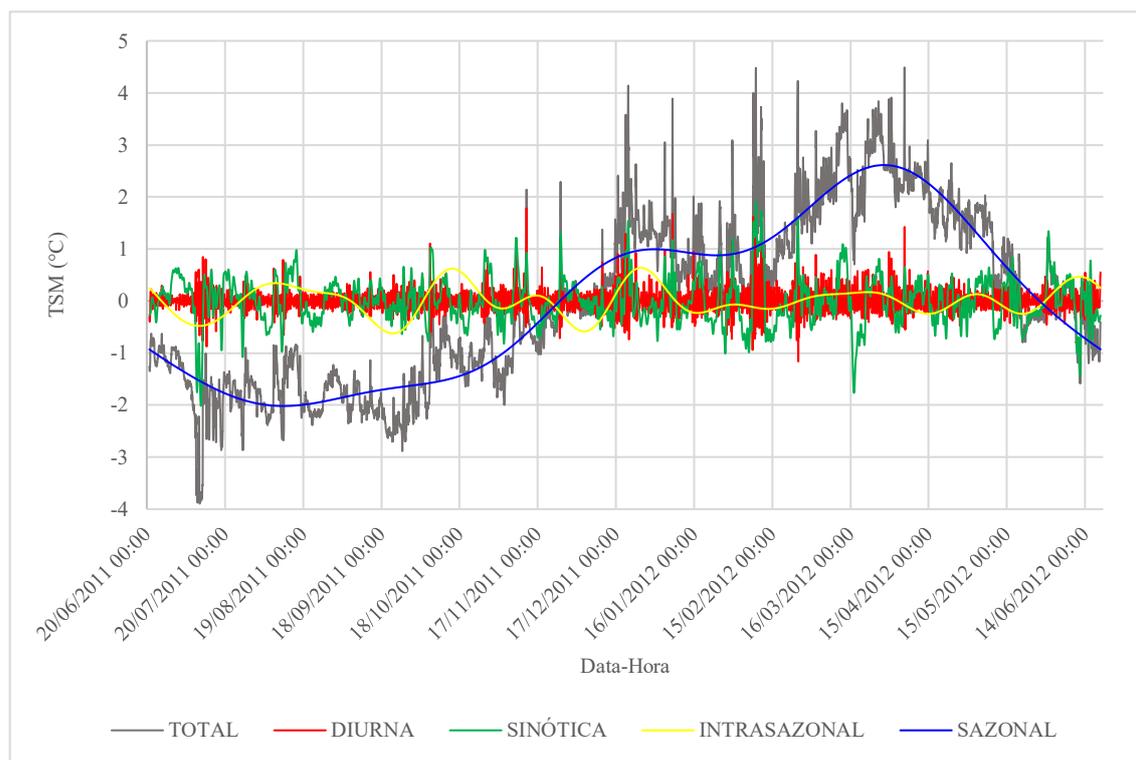


Fonte: Autor

#### 4.4.2 TSM

A amplitude térmica sazonal da TSM (Figura 4.49) foi  $4,63^{\circ}\text{C}$ , estando também provavelmente associada com a variação sazonal da radiação solar (Ivany & Juddy, 2022). O fato dessa amplitude ser menor do que a de TAR2M pode estar associado com a maior capacidade térmica da água do mar. A componente anual do espectro também foi a que mais contribuiu para a variância sazonal, tendo amplitude de  $2,04^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 4,1^{\circ}\text{C}$  de contribuição total). Semelhantemente a TAR2M, a curva sazonal se sobrepõe às demais no que tange à amplitude térmica, o que justifica a variância sazonal representar 87% da variância total. Pode-se dizer que, dentre todas as variáveis meteoceanográficas estudadas, a TSM foi a que apresentou maiores variações sazonalmente.

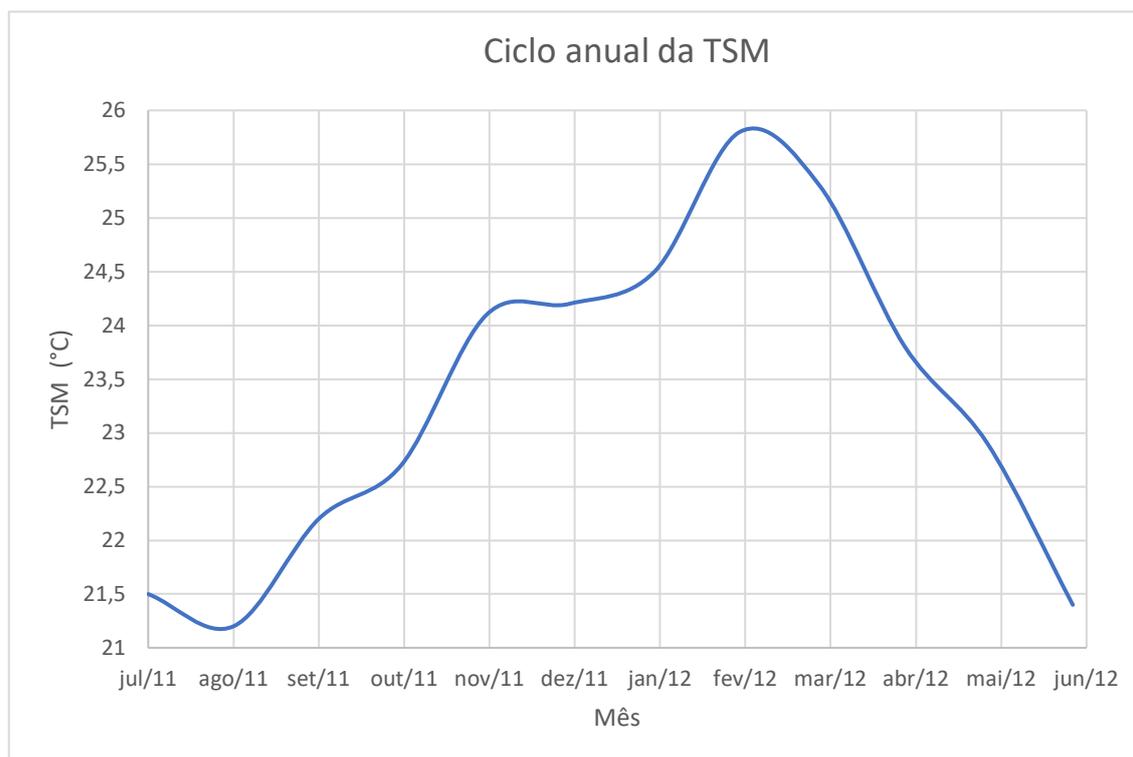
Figura 4.49 - Anomalia de TSM para cada escala de estudo



Fonte: Autor

O ciclo anual da TSM (Figura 4.50) tem valor máximo ( $25,8^{\circ}\text{C}$ ) em fevereiro e mínimo ( $21,2^{\circ}\text{C}$ ) em agosto.

Figura 4.50 - ciclo anual TSM

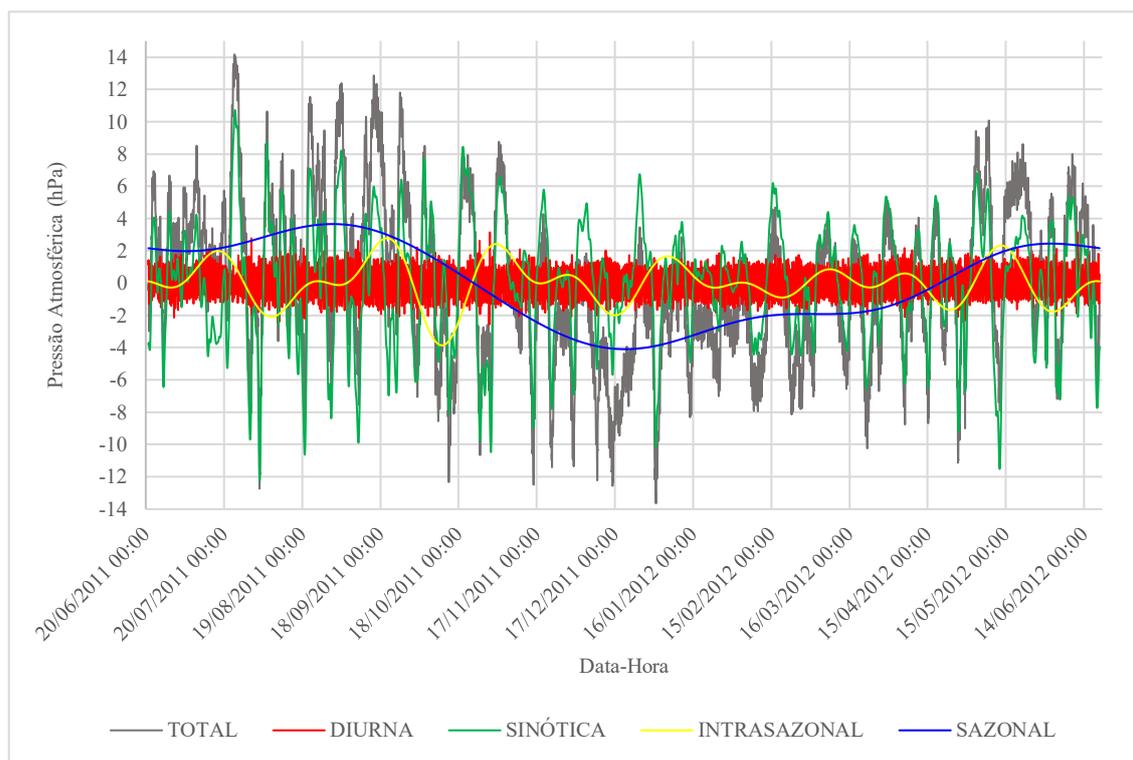


Fonte: Autor

#### 4.4.3 PNMM

O sinal sazonal da PNMM (Figura 4.51) teve uma amplitude de 7,75 hPa, com a anomalia máxima em início de setembro, e a mínima no início de janeiro. De acordo com Dereczynski (2022) essa variação é devida ao posicionamento do ASAS, que no inverno tem seu centro em sua posição mais ao norte e mais próximo do continente sul-americano, aumentando a pressão na BS; e em dezembro/janeiro o centro do ASAS encontra-se em sua posição mais ao sul e afastado do continente sul-americano, implicando nas pressões mínimas.

Figura 4.51 - Anomalia de PNMM para cada escala de estudo

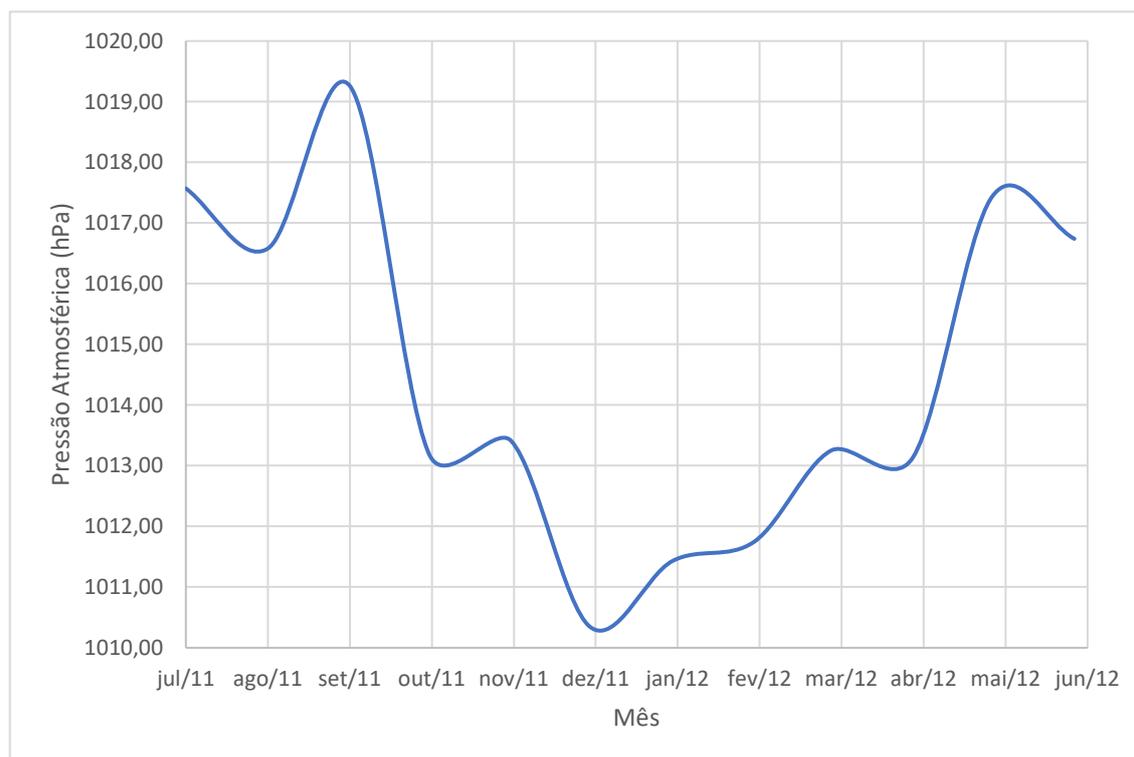


Fonte: Autor

De modo semelhante ao dos espectros de amplitude da TAR2M e da TSM, o espectro de PNMM (Figura 4.19) também teve uma componente anual com maior amplitude (3,2 hPa), contribuindo ao todo com 6,4 hPa. Entretanto, a variância da banda sazonal (27,8%) não foi a dominante em relação ao sinal total, mas sim a banda sinótica (62,1%) conforme ressaltado na discussão sinótica na seção 4.3

O ciclo anual de PNMM (Figura 4.52) teve a maior pressão em setembro (~1019 hPa), e a menor pressão (1010,2 hPa) em dezembro. Os valores climatológicos, assim como os meses de ocorrência do máximo e do mínimo de Dereczynski (2023) foram respectivamente 1020 hPa, em julho, e aproximadamente 1012 hPa, em dezembro. Considerando que as pressões do ERA5 possam estar 1 hPa superestimadas em relação à boia de Santos (Dereczynski,2023), então os valores encontrados concordam com a climatologia. Entretanto, o valor máximo está defasado de dois meses em relação à climatologia.

Figura 4.52 - Ciclo anual da PNMM

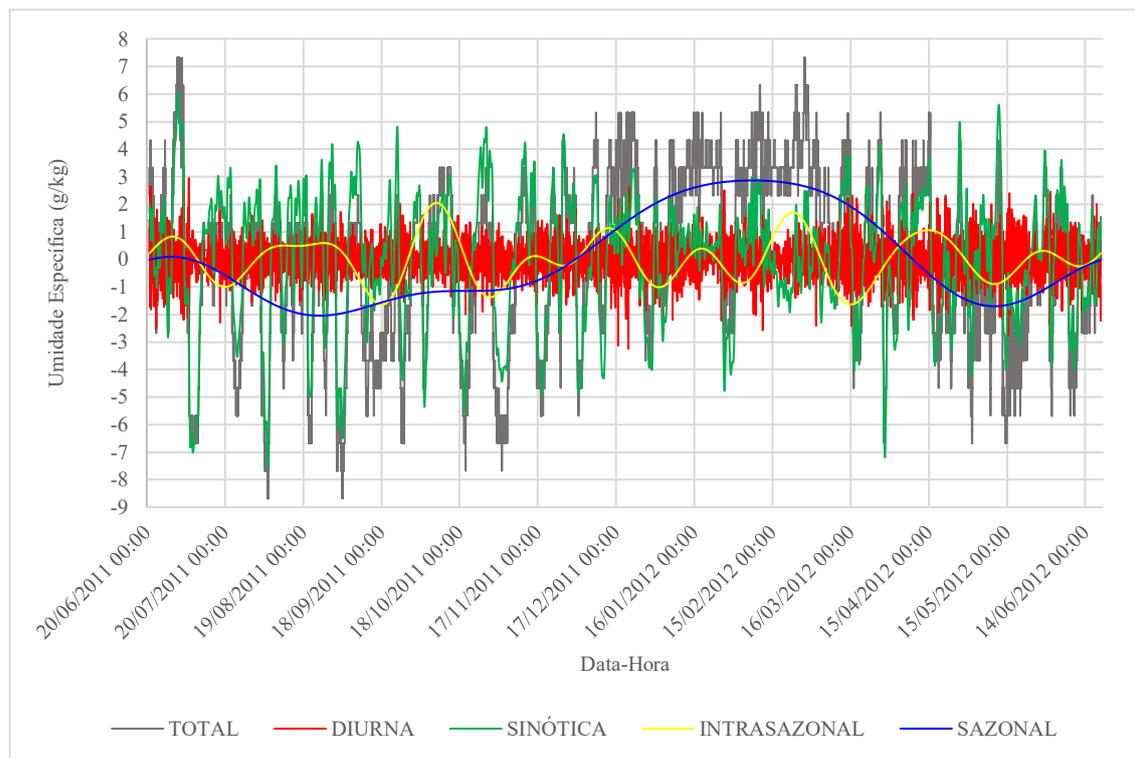


Fonte: Autor

#### 4.4.4 UR2M e q2M

No espectro de amplitude de UR2M (Figura 4.12) pode-se ver que a componente semestral tem uma amplitude (3,3 %) ligeiramente maior que a anual (3,1%), contrastando com a q2M (figura 4.13) que apresenta uma componente anual (~1,9 g/kg) que é o triplo da semestral. As anomalias de q2M (Figura 4.53) têm maiores variações sazonais do que as de UR2M, indicando a variação sazonal do conteúdo de vapor do ar, com anomalias mínimas (-2 g/kg) no final do inverno e início do outono, com a máxima (~2,5 g/kg) no verão, em fevereiro. Essa variação de quase 5 g/kg indica a influência principal da componente anual, seguida pela semestral.

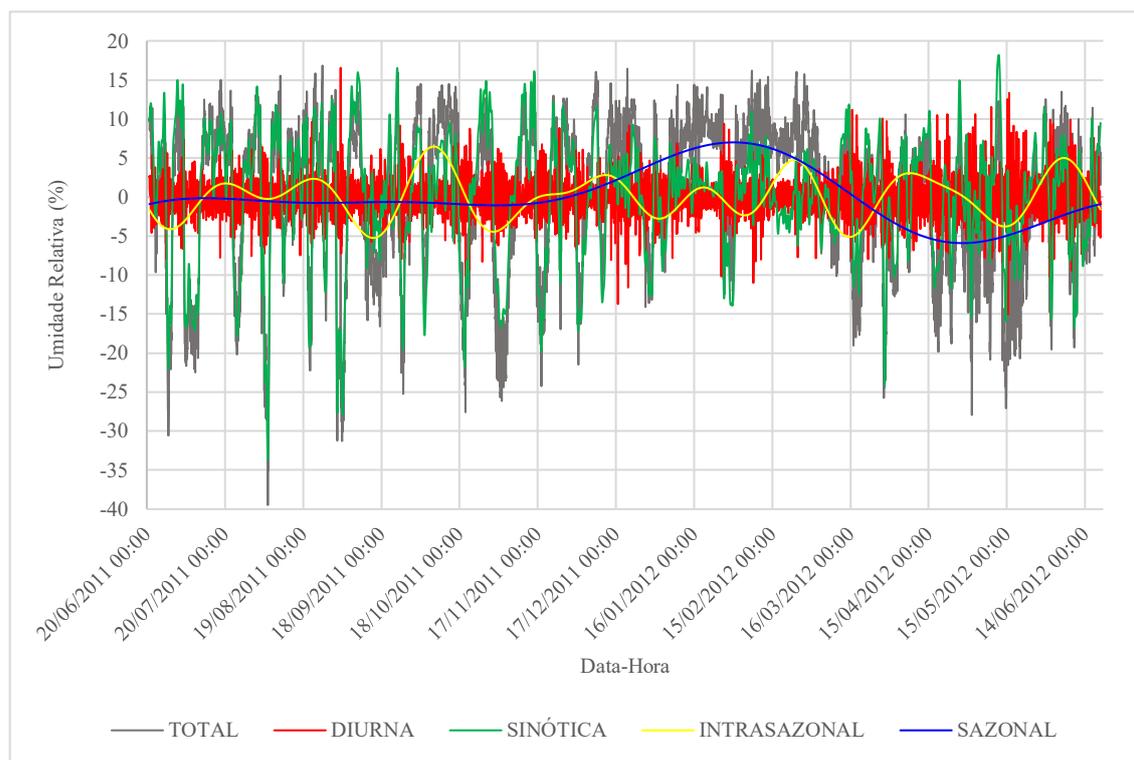
Figura 4.53 - Anomalia de q2M para cada escala de estudo



Fonte: Autor

Por outro lado, as anomalias de UR2M (Figura 4.54) apresentam amplitude significativa entre fevereiro e maio, de cerca de 14%, representando a componente semestral que foi um pouco mais significativa do que a anual. Essa decomposição do sinal da UR2M evidencia que de junho a novembro a influência do sinal sazonal é praticamente nula, sendo sugestivo que nesse período de inverno/primavera as principais influências sobre a UR2M, em escalas maiores que a diurna, estiveram na banda sinótica e intrasazonal (de 30 a 90 dias). A variância da banda sazonal de UR2M foi apenas 12,9% da variância total, enquanto a de q2M foi um pouco acima do dobro desse valor (28,2%). Conforme discutido na seção 4.3 as maiores variações de UR2M e q2M estão na banda sinótica.

Figura 4.54 - Anomalia de UR2M para cada escala de estudo



Fonte: Autor

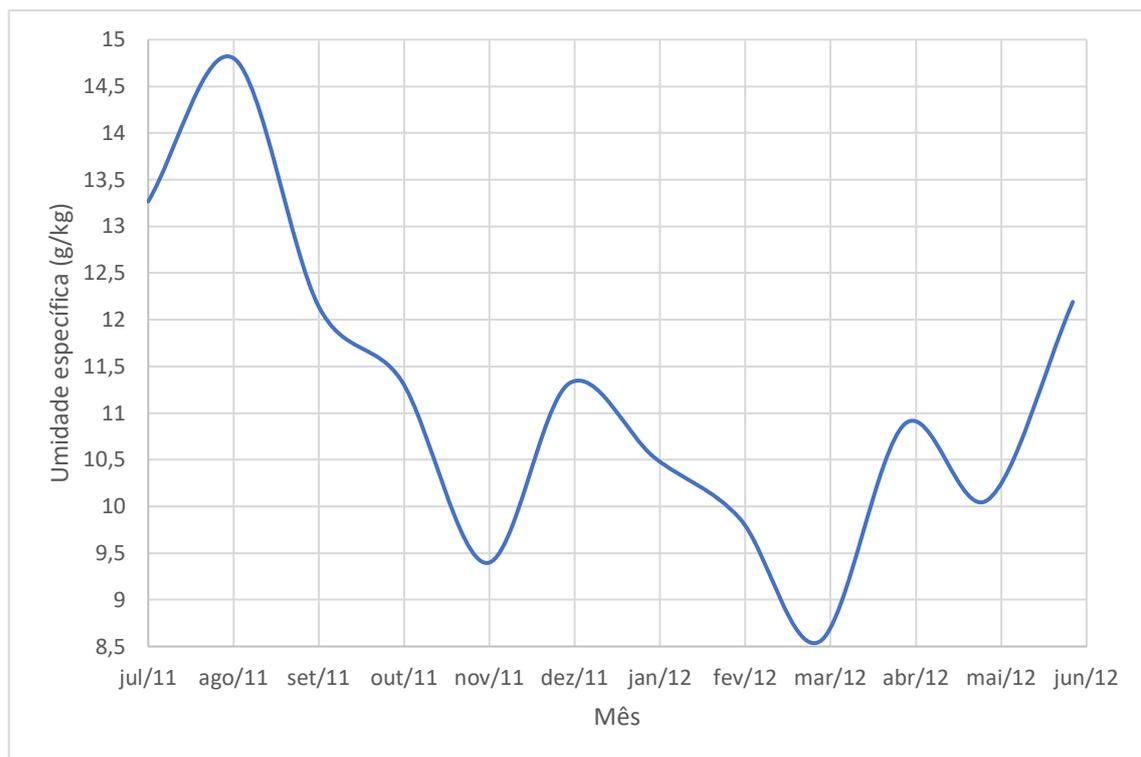
Os máximos e mínimos de UR2M e q2M entre fevereiro e início de maio (final de verão e início de outono) estiveram em fase. Até o final de março aproximadamente, q2M diminuiu e TAR2M aumentou, tendo, portanto, essas duas variações contribuído para a diminuição de UR2M nesse período. Posteriormente, até o início de maio, UR2M continua diminuindo principalmente devido à diminuição do conteúdo de vapor, já que a temperatura também diminuiu nesse período.

Portanto, tanto a UR2M quanto a q2M variam dentro do primeiro semestre de 2012 (janeiro a junho), ao passo que q2M variou sazonalmente também ao longo do segundo semestre de 2011.

Nos ciclos anuais de q2M (Figura 4.55) e de UR2M (Figura 4.56) pode-se ver que a UR2M varia diretamente e principalmente com q2M, ocorrendo valores máximos/mínimos (87,3 % / 73,5%) de umidade relativa quando a umidade específica é máxima/mínima (14,8 g/kg / 8,5 g/kg). Entretanto, a influência inversa da TAR2M (Figura 4.48) sobre a UR2M parece ter modificado o mínimo absoluto do seguinte modo: em q2M o menor valor se dá em setembro seguido pelo por um mínimo relativo em maio, enquanto a UR2M mínima ocorre nesse último

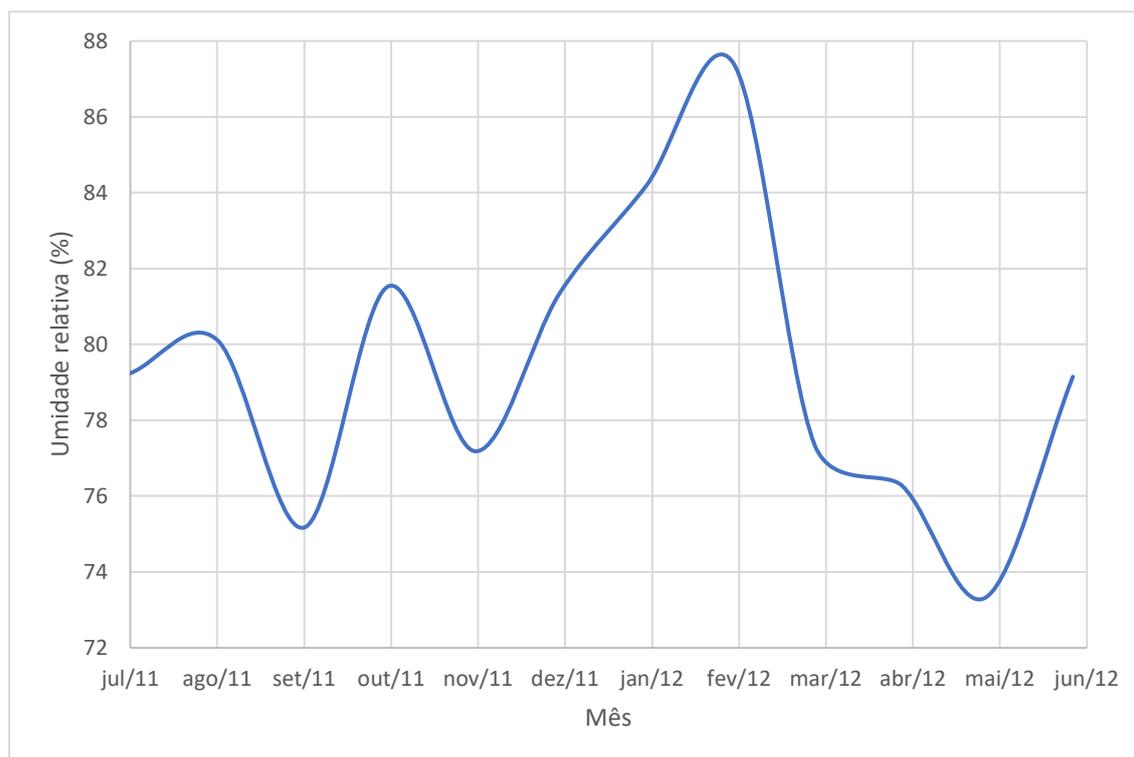
mês quando TAR2M é maior do que em setembro quando foi mínima. Esse mínimo de UR2M ocorrendo em maio e o máximo em fevereiro, estão de acordo com a normal climatológica de Dereczynski (2022), porém esses extremos diferem 4,3 % dos dessa climatologia, tendo um máximo maior (87,3 %) e um mínimo menor (73,5 %). Essa autora concluiu que os dados de UR2M da boia de Santos são 6% inferiores àqueles do ERA5, diferentemente do presente trabalho em relação ao máximo que foi 4,3% superior. O valor mínimo esteve 4,3% inferior, se aproximando mais da comparação realizada por Dereczynski (2022).

*Figura 4.55 - Ciclo anual q2M*



Fonte: Autor

Figura 4.56 - Ciclo anual UR2M



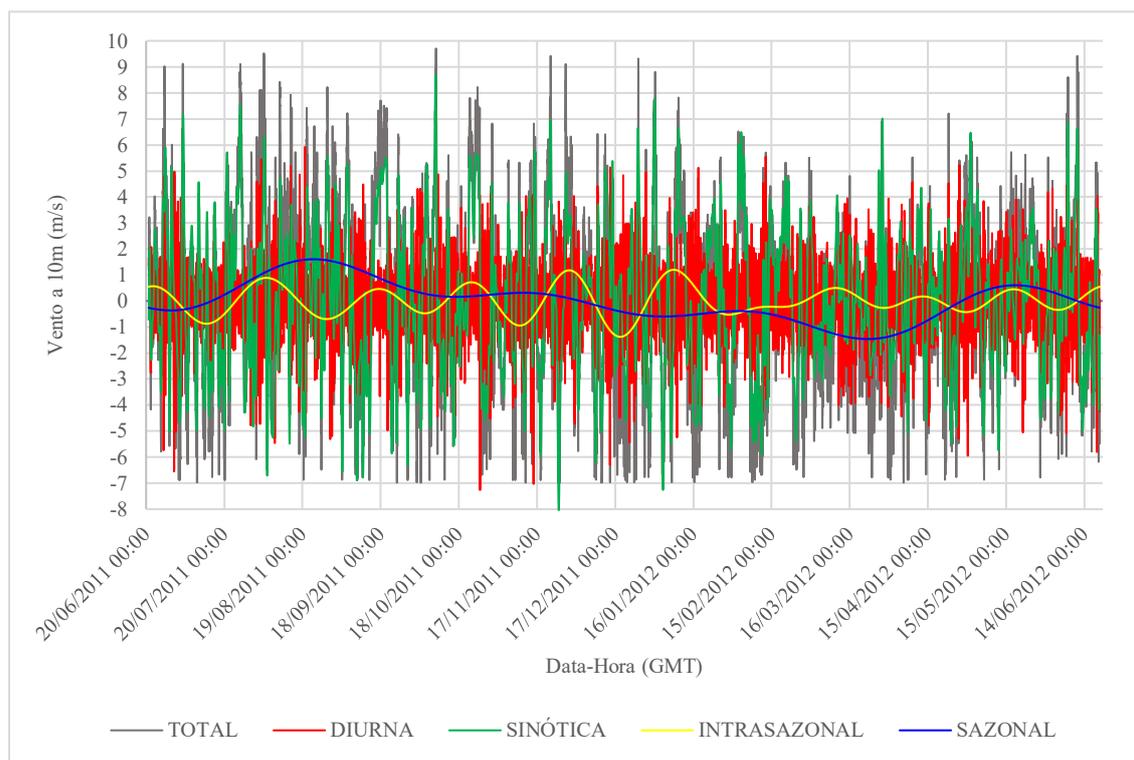
Fonte: Autor

Uma vez que os dados da boia podem estar até 6% inferiores aos do ERA5, então esses últimos valores poderiam ser 77 % para o máximo e 71,8 % para o mínimo. Sendo assim, no período analisado do presente trabalho pode ter ocorrido uma anomalia positiva de UR2M, provavelmente associada com uma anomalia positiva de q2M, significando um maior conteúdo de vapor, especialmente em fevereiro de 2012 quando alcançou seu maior valor. Ressalta-se que esse máximo de umidade específica esteve defasado de um mês em relação à TAR2M (Figura 4.48), o que pode estar indicando advecção de q2M no local.

#### 4.4.5 V10M

Na figura 4.57 vê-se que a anomalia de V10M apresenta uma amplitude máxima (16,74 m/s), enquanto a banda diurna apresenta uma amplitude máxima (13,19 m/s). Essas duas bandas perfizeram 92% da variância total do vento, ao passo que a banda sazonal representou apenas 5,3 %. Essa pequena representatividade da anomalia sazonal de V10M está representada por uma amplitude de cerca de 3 m/s, sendo máxima no inverno, em 19/08 (~2 m/s), e mínima no verão, no início de março (~-1 m/s).

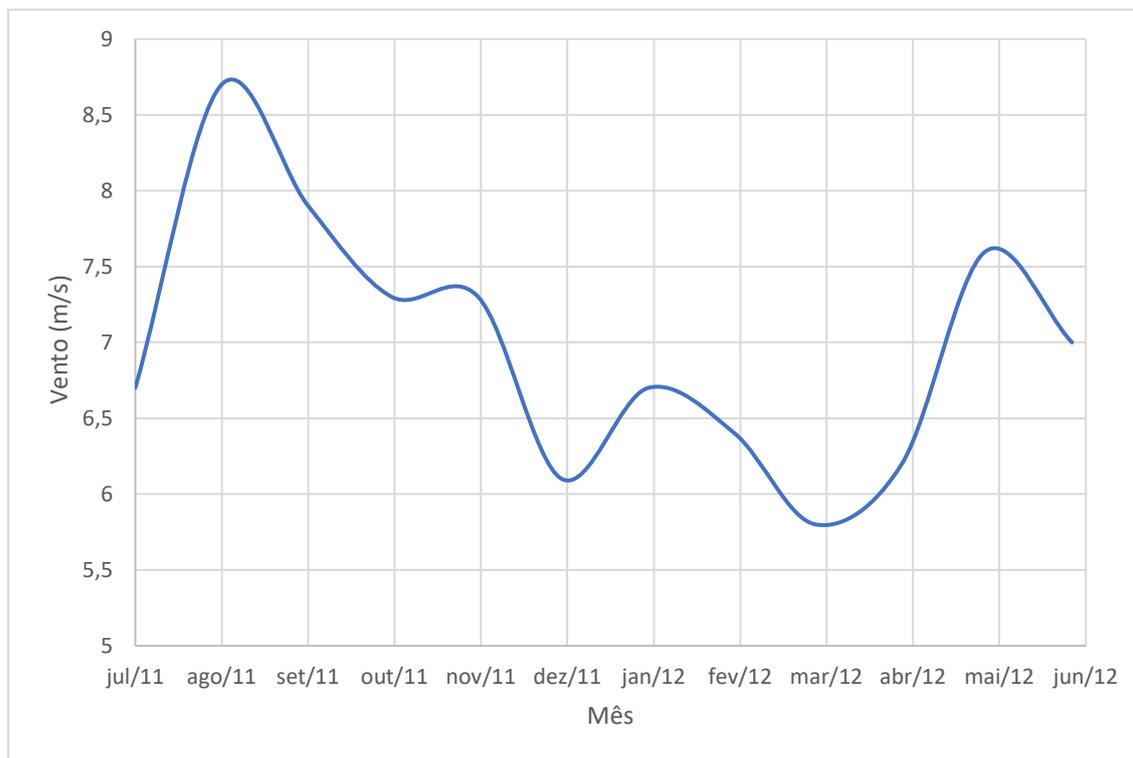
Figura 4.57 - Anomalia de V10M para cada escala de estudo



Fonte: Autor

No espectro de amplitude do V10M (figura 4.22) vê-se que a componente anual tem a maior amplitude (0,9 m/s). O cliço anual do V10M (figura 4.58) apresenta máximo (8,7 m/s) no mês de agosto, e mínimo (5,8 m/s) no mês de março, que quando comparados com Dereczynski (2022), são respectivamente 0,1 m/s e 0,2m/s maiores, ocorrendo respectivamente em fevereiro e julho, portanto, 1 mês antes.

Figura 4.58 - Ciclo anual do vento a 10 metros

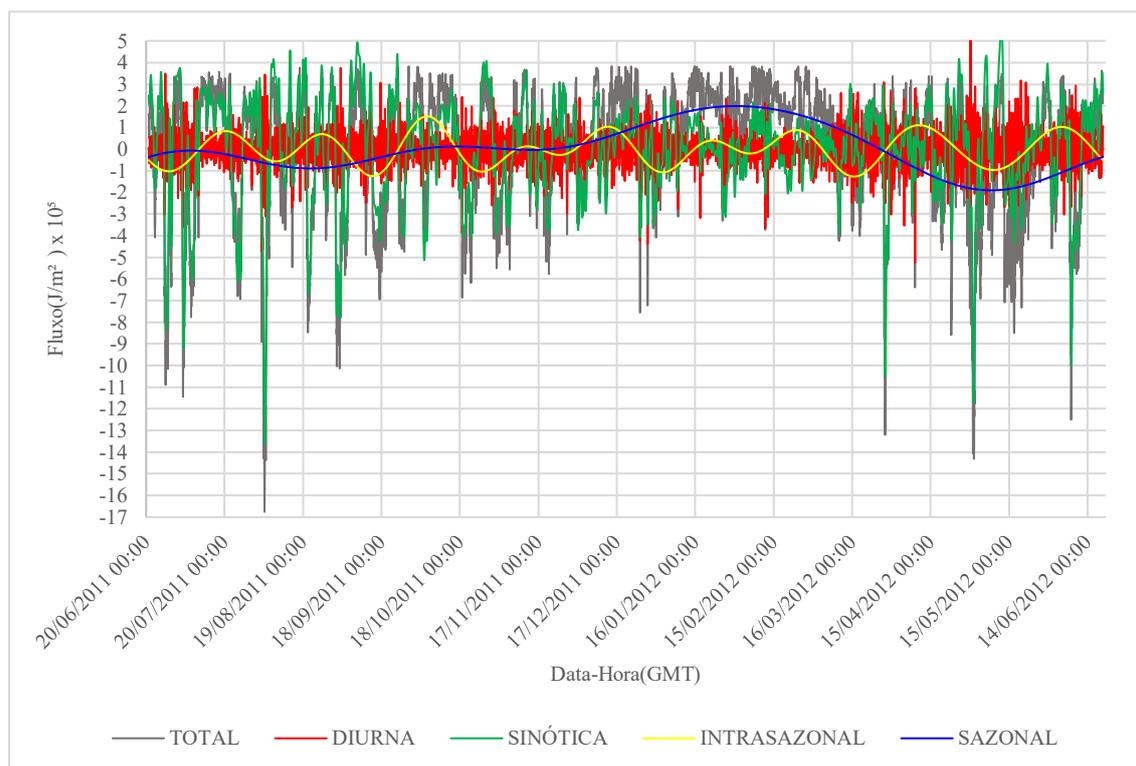


Fonte: Autor

#### 4.4.6 Fluxos de calor latente e de calor Sensível

Observa-se nitidamente que a variância sazonal segue a sinótica em importância relativa. A curva sazonal de LH (Figura 4.59) é semelhante à de  $q_2M$  (Figura 4.53), indicando a influência das variações do conteúdo de vapor sobre o fluxo de calor latente. Vê-se que as anomalias sazonais mínimas de LH em início de setembro ( $-1 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ ) e de maio ( $-2 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ ), assim como a anomalia máxima de  $2 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ , coincidiram com as anomalias de  $q_2M$

Figura 4.59 - Anomalia Dos fluxos de calor latente para cada escala de estudo

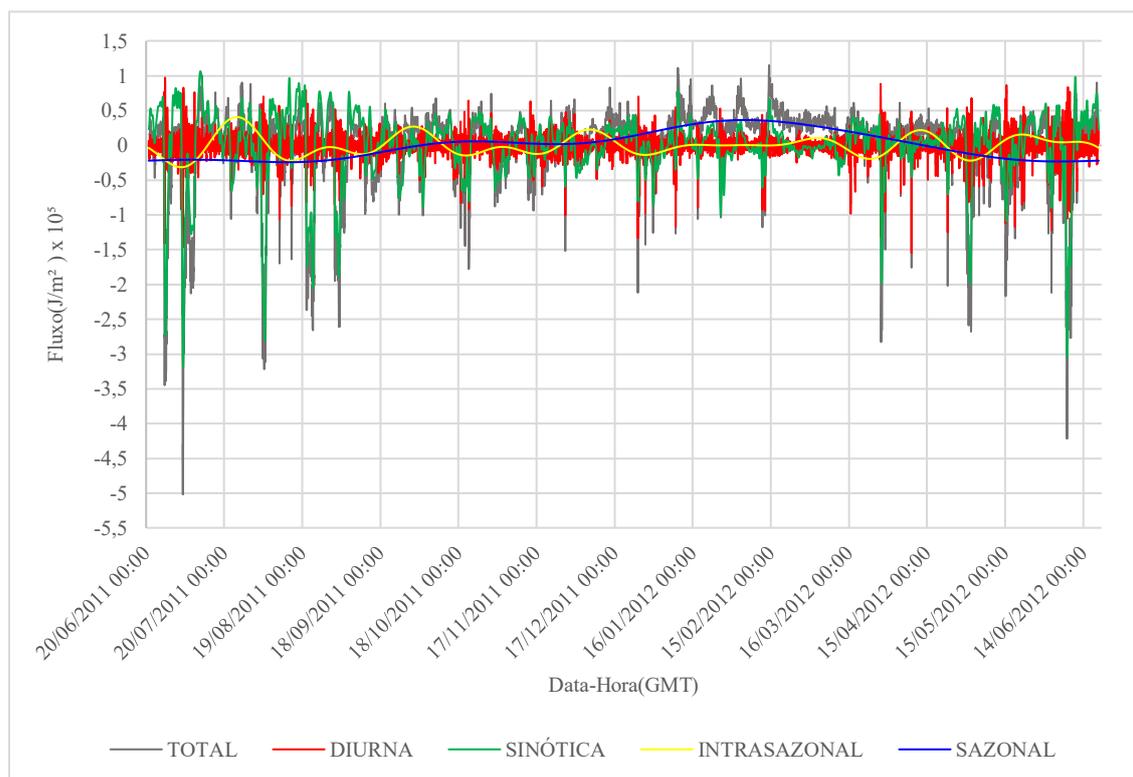


Fonte: Autor

A curva sazonal de V10M (Figura 4.57) tem anomalias máximas em inícios de setembro/2011 e de junho/2012, justamente quando q2M e HL são mínimos. Os máximos dessas duas últimas propriedades ocorrem quando a anomalia de V10M é aproximadamente nula. Sendo assim, sugere-se que a variação sazonal de LH não é função principalmente da variação de V10M, mas sim do conteúdo de vapor do ar.

Na figura 4.60 vê-se que as anomalias do fluxo de calor sensível apresentam características similares às de , tendo também a anomalia máxima no verão e as mínimas na primavera e outono. As variações de SH acompanham às de TAR2M (Figura 4.41) e TSM (Figura 4.43), indicando a dependência sazonal que esse fluxo de calor tem das diferenças entre TSM e TAR2M. Assim como a TAR2M e a TSM, a curva de SH é bem representada por uma senoide.

Figura 4.60 - Anomalia dos fluxos de calor sensível para cada escala de estudo



Fonte: Autor

## 4.5 Comparação entre os Dados do ERA5 e Dados da Boia do PNBOIA

Ao comparar a estatística dos dados de reanálise com os dados observado(Quadro 11) a TSM apresenta valores de média e moda próximos, com viés de 0,09°C, o desvio padrão e a variância dos dados de reanálise (1,60°C e 2,59°C<sup>2</sup>) são praticamente os mesmos dos dados observados (1,61°C e 2,57°C<sup>2</sup>).O valor máximo da reanálise do ERA5(26,45°C) é aproximadamente 1,2°C menor que o observado, o valor mínimo da reanálise do ERA5(19,78°C) é 0,4°C, implicando em uma amplitude máxima 1,7°C inferior à dos dados do PNBOIA. A correlação entre os dados de reanálise e os observados foi de 0,96, muito forte. A Raiz do erro médio quadrático entre esses dois conjuntos de dados é de 0,44°C. Portanto os dados de reanálise ERA5 apresentam comportamento e valores próximos do observado. Pode-se dizer que a TSM do ERA5 é muito próxima da medida pelo sensor da boia, especialmente por causa do viés muito pequeno (0,09°C).

Quadro 11 - Estatística descritiva dos dados de TSM do ERA5 e da boia de Santos

	OBSERVADO	REANÁLISE
MÉDIA	23,28	23,37
MEDIANA	23,19	23,23
MODA	21,70	21,81
DESVIO PADRAO	1,61	1,60
VARIANCIA	2,59	2,57
VALOR MAXIMO	27,77	26,45
VALOR MINIMO	19,38	19,78
AMPLITUDE	8,40	6,67
VIÉS	0,096	

Fonte: Autor

Para a TAR2M (quadro 12) a média a mediana e a moda de reanálise apresentaram valores superiores aos observados, com viés igual 1,05 sendo a maior diferença na moda (25,37°C) que superou a moda observada (22,4°C) em aproximadamente 3°C. O desvio padrão de reanálise foi 0,1°C menor, consequentemente a variância também foi menor. O valor máximo para TAR2M obtido pelos dados de reanálise do ERA5 (27,24°C) é 0,5°C menor que o observado, enquanto o mínimo da TAR2M (19,78°C) é aproximadamente 4°C maior em comparação ao dado da boia. A correlação entre os dados de reanálise e os observados foi de 0,96 e a RMSE para os valores de reanálise é de 0,59°C. Deste modo os dados de reanálise do ERA5 para TAR2M são superestimados em média 1°C, o que também foi observado por Dereczynski 2022.

Quadro 12 Estatística descritiva dos dados de TAR2M do ERA5 e da boia de Santos

	OBSERVADO	REANÁLISE
MÉDIA	22,60	23,66
MEDIANA	22,60	23,12
MODA	22,40	25,37
DESVIO PADRAO	2,07	1,97
VARIANCIA	4,29	3,86
VALOR MAXIMO	27,70	27,24
VALOR MINIMO	15,80	19,78
AMPLITUDE	11,90	7,46
VIÉS	1,059	

Fonte: Autor

Na avaliação da PNMM (quadro 13) a média e a mediana da reanálise são superiores ao observado, com viés 1,25, e a moda é superior em 6 hPa. O desvio padrão e a variância são próximos. O Valor máximo de PNMM do ERA5 (1031,93hPa) é 2,7hPa maior que o observado

e o valor mínimo (1001,93hPa) é 1,1hPa maior em comparação ao obtido pela boia. A correlação entre os dados de reanálise e os observados foi de 0,99 e RMSE para os valores de reanálise é de 1,33hPa, com viés de 1,26. Conclui-se que os dados de reanálise da PNMM são superestimados, conforme também observado por Dereczynsky (2022).

Quadro 13 Estatística descritiva dos dados de PNMM do ERA5 e da boia de Santos

	OBSERVADO	REANÁLISE
MÉDIA	1014,46	1015,72
MEDIANA	1014,22	1015,41
MODA	1011,67	1017,51
DESVIO PADRAO	4,79	4,82
VARIANCIA	22,99	23,24
VALOR MAXIMO	1028,61	1031,33
VALOR MINIMO	1000,80	1001,93
AMPLITUDE	27,81	29,40
VIÉS	1,260	

Fonte: Autor

Quanto a V10M (quadro 14) a média e a mediana do ERA5 são menores que o observado, com viés igual a -1,41, e a moda é 3,3m/s menor. O desvio padrão dos dados de reanálise(2,8m/s) também é inferior ao observado em ~0,5m/s. O valor mínimo do vento está associado a períodos de calmaria, mas o valor máximo de reanálise também é inferior ao observado em aproximadamente 3,2m/s. A correlação entre os dados de reanálise e os observados foi a menor comparada com as anteriores 0,86 e RMSE para os valores de reanálise é de 2,19m/s portanto o ERA5 subestima a intensidade do vento a 10m. V10M em aproximadamente 2,2 m/s, conforme Dereczynski (2022) também obteve.

Quadro 14 Estatística descritiva dos dados de V10M do ERA5 e da boia de Santos

	OBSERVADO	REANÁLISE
MÉDIA	6,98	5,57
MEDIANA	6,90	5,55
MODA	7,90	4,54
DESVIO PADRAO	3,29	2,80
VARIANCIA	10,80	7,85
VALOR MAXIMO	16,70	13,52
VALOR MINIMO	0,00	0,06
AMPLITUDE	16,70	13,46
VIÉS	-1,414	

Fonte: Autor

Para os fluxos de calor latente (quadro 15) e média e a mediana estão aproximadamente  $0,5 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ , a moda, entretanto é  $0,9 \times 10^5 \text{ J/m}^2$  maior. Tanto o desvio padrão como a variância

do modelo são similares aos dos dados observados. A correlação ente os dados é de 0,92 e RMSE é  $1,21 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ . com viés de  $0,51 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ , e tendo em vista que os valores mais negativos do fluxo indicam maior transferência de calor na interface ar mar, os dados de reanálise dos fluxos de calor latente são subestimados.

Quadro 15 Estatística descritiva dos dados de fluxo do calor latente do ERA5 e da boia de Santos

	OBSERVADO	REANÁLISE
MÉDIA	-3,83	-3,31
MEDIANA	-3,10	-2,46
MODA	-2,44	-1,56
DESVIO PADRAO	2,82	2,60
VARIANCIA	7,96	6,78
VALOR MAXIMO	0,00	-0,04
VALOR MINIMO	-20,59	-18,21
AMPLITUDE	20,59	18,17
VIÉS	0,517	

Fonte: Autor

Os dados de reanálise dos fluxos de calor sensível (quadro 16) têm valores de média, mediana e moda mais próximos se comparados aos fluxos de calor latente. Isto também é observado na comparação com os desvios padrão e a variância. Apesar disso, a correlação entre os dados de reanálise e os observados (0,87) foi inferior. O viés de  $0,01 \times 10^5 \text{ J/m}^2$  indica que os fluxos de calor sensível do ERA5 em média estão condizentes com os dados observados.

Quadro 16 Estatística descritiva dos dados de fluxo do calor sensível do ERA5 e da boia de Santos

	OBSERVADO	REANÁLISE
MÉDIA	-0,29	-0,28
MEDIANA	-0,12	-0,14
MODA	-0,04	0,02
DESVIO PADRAO	0,57	0,47
VARIANCIA	0,33	0,22
VALOR MAXIMO	0,86	0,74
VALOR MINIMO	-5,31	-3,47
AMPLITUDE	6,17	4,21
VIÉS	0,012	

Fonte: Autor

## 5 Conclusões e recomendações

O presente trabalho forneceu uma análise abrangente e detalhada da variação de variáveis meteoceanográficas como temperatura do ar a 2 metros, temperatura da superfície do mar, pressão atmosférica ao nível do mar, umidade relativa, umidade específica, velocidade do vento a 10 metros e fluxos de calor latente e sensível. Inicialmente se fez necessário um tratamento de dados afim de garantir a assertividade das análises subsequentes.

A implementação dos testes de controle de qualidade QARTOD nos dados coletados pela Boia Meteoceanográfica de Santos demonstrou ser uma prática essencial para assegurar a confiabilidade e a qualidade dos dados. Este protocolo mostrou-se alinhado com os padrões estabelecidos por organizações como a UNESCO, IOOS e CHM, garantindo assim um padrão internacionalmente aceito para avaliação de dados oceanográficos e meteorológicos. Os diferentes testes executados serviram para identificar anomalias, ausências de dados e variações que pudessem comprometer a qualidade do conjunto de dados.

A aplicação dos métodos de QARTOD permitiu, portanto, uma abordagem sistemática para identificar erros e inconsistências, que foram corrigidos de acordo com as normas preestabelecidas. Os testes de localização garantiram que os dados foram coletados na região desejada, enquanto os métodos estatísticos asseguraram que qualquer dado espúrio fosse identificado e tratado de forma adequada, seja através de substituição por valores médios ou por meio de interpolação linear. A última etapa de verificação das exceções foi particularmente importante para assegurar que eventos climáticos extremos, como sistemas frontais, não fossem incorretamente categorizados como anomalias, preservando assim a integridade dos dados coletados em tais condições.

A implementação do QARTOD não apenas eleva o nível de confiabilidade do conjunto de dados, como também facilita a sua utilização por pesquisadores, gestores e pelo público em geral. A qualidade dos dados é fundamental em estudos oceanográficos e meteorológicos, onde dados imprecisos ou inconsistentes podem levar a conclusões errôneas.

A TSM e a temperatura do ar tiveram a banda sazonal representando 87% e 72% da variância total respectivamente, seguidas pela banda sinótica. O ar sobrejacente à borda da plataforma continental, por onde escoia a Corrente do Brasil, é úmido e tende a ser instável, implicando em perda de fluxos turbulentos de calor para a atmosfera. Essa instabilidade se deve ao fato de a TSM ser em grande parte do tempo maior do que a temperatura do ar, o que pode estar associado aos fluxos de calor da Corrente do Brasil.

O estudo aponta para uma diferença na ordem de grandeza dos fluxos: os de calor latente são uma ordem de grandeza superiores aos de calor sensível, significando que uma maior demanda de energia para a mudança de estado.

A TSM teve uma distribuição com assimetria positiva, causada pela baixa frequência de temperaturas superiores a 27°C, no verão e início de outono. Por outro lado, a temperatura do ar apresentou assimetria negativa, por causa da baixa frequência de ocorrência de valores inferiores a 17°C, os quais ocorreram durante as frentes mais intensas.

O ar sobrejacente à borda da plataforma continental é principalmente aquecido indiretamente a partir da radiação emitida pelo oceano em ondas longas, assim como pelos fluxos de calor latente e sensível. Tal fato está expresso na forte correlação de Pearson encontrada (0,87). A umidade do ar imediatamente sobre essa região é o tempo todo relativamente alta, mas na altitude de 2 metros a maior umidade específica ocorre no verão (~13,6 g/kg), contrastando com as demais estações (~10 g/kg).

A umidade relativa do ar e a umidade específica apresentaram assimetria negativa, causada pelos seus baixos valores devido ao ar seco trazido pelas altas migratórias pós frontais, além da diminuição sazonal da umidade específica.

A pressão atmosférica ao nível do mar apresentou grandes amplitudes durante a passagem dos sistemas frontais, tendo uma assimetria positiva

Na borda da plataforma continental de Santos o vento predominante é de NE, indicando a influência do ASAS.

Em relação aos ciclos diurnos das propriedades meteoceanográficas, ressaltam-se os seguintes aspectos:

- i) A variação diurna da TSM e da temperatura do ar são devidas a irradiação solar e a rotação da Terra;
- ii) O ciclo diurno da TSM tem menor duração que o da TAR2M, estando a TSM mínima defasada de + 2h em relação à TAR2M, enquanto o máximo ocorre uma hora antes;
- iii) As amplitudes da TSM são menores do que a da TAR2M, provavelmente devido à maior capacidade térmica da água do mar;
- iv) As amplitudes térmicas aumentaram entre o inverno e o verão, provavelmente em virtude da variação da radiação solar incidente, das magnitudes do vento, da cobertura de nuvens e da dinâmica oceânica;
- v) O ciclo diurno de UR2M varia inversamente com a TAR2M;

- vi) Entre o inverno e o verão, os ciclos diurnos de UR2M têm valores absolutos aumentando em função do aumento do conteúdo de vapor do ar nesse período, o que é expresso pelo aumento da umidade específica (q2M);
- vii) O ciclo diurno de q2M variam em fase com o de UR2M, mas com contribuição insignificante para UR2M;
- viii) A PNMM é caracterizada pela maré barométrica com amplitudes de 2 hPa, estando associada com a ressonância entre ondas de leste com período de 12 h e a forçante térmica, de pequena amplitude, com esse mesmo período;
- ix) A maré barométrica teve menor pressão no mínimo que ocorre pela manhã, contrastando com a climatologia cujo menor valor ocorre no final da tarde;
- x) Com exceção do inverno, o ciclo diurno de V10M teve um máximo às 00:00-01:00 e um mínimo às 17:00. A causa desses valores extremos precisa ser investigada ainda.
- xi) As maiores perdas de calor latente e sensível ocorrem no fim da tarde/noite (19:00 às 23:00), justamente quando as magnitudes do vento crescem, implicando em maior evaporação e conseqüente resfriamento da TSM.

Em relação às variações sinóticas das propriedades meteocanográficas ressaltam-se as seguintes características:

- i) Com exceção da TSM e TAR2M, todas as demais propriedades tiveram a maior variância relativa na banda sinótica: V10M (75%), SH (73,3%), LH (73%), UR2M (72,3%), PNMM (62,1%) e q2M (60,5%);
- ii) Essa variância está relacionada com a passagem dos sistemas frontais, os quais implicam em intensas variações das propriedades;
- iii) Foram analisadas a passagem de duas frentes frias: em 03/07/2011 e em 02/08/2011, com as propriedades respondendo como se segue;
- iv) Nos períodos pré-frontais a PNMM diminuiu e o vento enfraqueceu, mas a TAR2M e a TSM aumentaram somente antes da passagem da frente de agosto;
- v) O período pós frontal foi caracterizado pelo aumento de V10M e PNMM, ao passo que TAR2M, UR2M e q2M diminuem. Isso se dá porque o ar frio e seco que está na retaguarda da frente se desloca junto com a alta migratória pós frontal, passando por sobre a boia;

- vi) As maiores anomalias de q2M, UR2M, V10M, SH e LH, ocorreram nesse período, sendo isso consequência dessas propriedades terem a banda sinótica com a maior variância relativa;
- vii) Ressalta-se que LH e SH dependeram tanto das velocidades do vento quanto das diferenças de umidade e temperatura respectivamente, já que tanto a variável dinâmica quanto a parcela termodinâmica tiveram anomalias relativamente grandes;
- viii) Houve uma diminuição da TSM um dia após a passagem do sistema frontal, o que pode ter sido causada tanto pela intensa perda de calor latente e sensível, quanto pelo aumento do vento que intensifica a mistura turbulenta na camada superficial do oceano.

Em relação às variações sazonais destacam-se os seguintes aspectos:

- i) TAR2M e TSM são bem representadas por uma senoide com período de um ano;
- ii) TAR2M e TSM tiveram uma variância sazonal de 72% e 87% da variância total respectivamente;
- iii) Essas temperaturas estão fortemente correlacionadas.
- iv) A TSM foi a propriedade mais sujeita às variações sazonais, o que está expresso na variância relativa de 87%;
- v) As anomalias sazonais de calor sensível estiveram em fase com as diferenças entre TSM e TAR2M, indicando que SH depende sazonalmente das diferenças de temperatura nos dois primeiros metros de altitude;
- vi) As variações sazonais da PNMM estiveram associadas com a variação do posicionamento do ASAS.
- vii) As anomalias sazonais de umidade específica e de calor latente estiveram em fase, indicando que sazonalmente LH depende principalmente das diferenças de umidade nos dois primeiros metros de altitude;
- viii) V10M, diferentemente das demais propriedades que tiveram maior variância na banda sinótica, não teve a banda sazonal em segunda importância relativa.

A comparação entre os dados de reanálise ERA5 e os observados pela boia meteoceanográfica de Santos apresentou resultados que variam em termos de precisão e viés para diferentes parâmetros meteorológicos e oceânicos. Em geral, os dados de reanálise ERA5 mostram uma alta correlação com os dados observados, sugerindo que o modelo de reanálise é

uma ferramenta robusta para a representação do clima e das condições oceânicas na região estudada.

Para a temperatura da superfície do mar e a pressão ao nível médio do mar, os dados do ERA5 foram bastante próximos aos observados, com diferenças mínimas em termos de média, mediana e variância. Isso sugere que o ERA5 representa bem o comportamento dessas variáveis na região.

Quanto à temperatura do ar a 2 metros, os dados do ERA5 mostraram uma superestimação consistente. Esta superestimação já foi previamente observada por Dereczynski 2022 e confirmada neste estudo.

Para a velocidade do vento a 10 metros, o ERA5 subestimou a intensidade do vento, o que pode estar relacionado com os resultados dos fluxos de calor latente. Os dados sobre fluxos de calor latente e sensível apresentaram resultados mistos. Enquanto os dados do ERA5 para os fluxos de calor sensível estão em concordância com os calculados, os fluxos de calor latente foram subestimados.

Em resumo, os dados de reanálise do ERA5 apresentam grande correlação com os dados observados, validando a eficácia do conjunto de dados de reanálise ERA5 para área de estudada, entretanto é importante reconhecer suas limitações para variáveis como velocidade do vento.

## 6 Referências Bibliográficas

ALVARES et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**, 2013.

ANDRADE, Kelen Martins. **CLIMATOLOGIA E COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS FRONTAIS SOBRE A AMÉRICA DO SUL**. 2005. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia (Título de mestrado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [S. l.], 2005

ANP. **Boletim da Produção de petróleo e gás**. Agência Nacional do Petróleo, gás natural e Biocombustíveis. [S.l.]. 2023.

BUSSAB, WILTON D. O.; MORETTIN, PEDRO A. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 201

CARVALHO, R. A. **Intrusão da Água Tropical na Plataforma Continental entre Paranaguá (PR) e Santos (SP)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais) – Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, Marinha do Brasil, Niterói, 2019.

CASTRO, B. M. *et al.* Correntes e Massas de Água na Plataforma Continental. In: MARTINS, R. P. & GROSSMANN-MATHESON, G. S. **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats v. 2, p. 189-252, 2015.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. Dados do PNBOIA. **CHM**, 08 ago. 2018. Disponível em: <[www.marinha.mil.br/chm/dados-do-pnboiaboias-21](http://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-pnboiaboias-21)>.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. **Controle de Qualidade de Dados**. Marinha do Brasil. Niteroi. 2019.

COELHO, Arthur wilson fonseca. **ANÁLISE DE MASSAS DE ÁGUA ENTRE PERUÍBE (SP) E PARANAGUÁ (PR) NO TERÇO FINAL DA PRIMAVERA (2017): CARACTERÍSTICAS SAZONAIS E SINÓTICAS**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais) - Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil, [S. l.], 2022. f. 105.

CRAMÉR, Harald. **Mathematical Methods of statistics**. Princeton: Princeton University Press, 1946.

CRONIN, Meghan F. et al. Air-Sea Fluxes With a Focus on Heat and Momentum. **Frontiers in Marine Science**, 31 jul. 2019. 30.

DAI, Aiguo. The diurnal cycle from observations and ERA5 in surface pressure, temperature, humidity, and winds. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 61, p. 2965-2990, 2023.

DERECZYNSKI, Claudine et al. **Projeto de caracterização Regional da Bacia de Santos - Meteorologia e Oceanografia da Bacia de Santos**. 2023.

DOURADO, Marcelo; CARDOSO, Denis Harley. One-dimensional modeling of the oceanic

boundary layer during passage of a cold front in the Brazil-Malvinas confluence region. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], p. 367-378, 1 set. 2014.

DOURADO, Marcelo. Observational description of the atmospheric and oceanic boundary layers over the Atlantic Ocean. **Brazilian Journal of Oceanography**, [s. l.], p. 1-2, 10 jan. 2001

FAIRALL, C W. et al. Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for. **AMS JOURNAL OF CLIMATE**, 15 fev. 2003. 21.

FAIRALL, C. W.; BRADLEY, E. F.; ROGERS, D. COARE BULK AIR-SEA FLUX ALGORITHM. **COAPS**, 2001. Disponível em: <[https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux\\_algor/flux.html#CWF](https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/flux.html#CWF)>. Acesso em: 18 ago. 2023.

FERNANDEZ, Luiz E. O. Métodogenérico para Estimacão e modelagem de Erro RMS em Dados de Profundidade de Sensores para Visão 3D. **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, Natal-RN, 05 Julho 2017. 74.

FRANCO, Alberto D. S. **Marés, Fundamentos, Análise e previsão**. 2. ed. Niteroi: Base de Hidrografia da Marinha em Niteroi, 2009.

GODOI, S. S. **Dinâmica quase-geostrófica do Sistema Corrente do Brasil no embaimento de São Paulo**. Tese (Doutorado em Oceanografia Física). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. HERCOS, Cizia et al. **Projeto de Caracterizaco da Bacia de Santos - Geologia e geomorfologia da Baia de Santos**.

HERSBACH, hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 15 jun. 2020. 51.

HILSDORF, Wilson D. C.; NETO, Mário D. S. N. **Porto de Santos: prospeco sobre as causas das dificuldades de acesso**, 2016.

IOOS. **Manual for Real-Time Quality Control of Water level Data**, 2021.

IOOS. **Manual for Real-Time Oceanographic Data Quality Control Flags**, 2022.

KAWAI, Yoshimi; WADA, Akiyoshi. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A Review. **Journal of Oceanography**, [s. l.], v. 63, p. 721-744, 2007.

IVANY, Linda C.; JUDD, Emily J. Deciphering Temperature Seasonality in Earth’s Ancient Oceans. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, [s. l.], p. 123-152, 9 dez. 2021

LEONARDO, NOELE F. **VARIABILIDADE DIURNA E SAZONAL DO ATLÂNTICO EQUATORIAL, UTILIZANDO DADOS DE UMA BÓIA (0°S 23°W) DO PROJETO PIRATA**. 2010. 52.

LINDZEN, R.S. (1979). **Atmospheric Tides**. An. Rev. Earth & Plan. Sci. 7, 199–225

MEDEIROS, L. R. P. **Massas de água entre Ubatuba (SP) e Baía de Guanabara (RJ)**:

**Variações Sinóticas, Sazonais e de Mesoescala.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais) – Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, Marinha do Brasil, Niterói, 2020.

MELO FILHO., E. Maré Meteorológica na Costa Brasileira, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, Abril 2017.

MIGUENS, Altineu Pires. **Navegação: Ciência e Arte:** Navegação costeira, Estimada e em águas Restritas. 1. ed. rev. e atual. [S. l.: s. n.], 2019. v. 1.

PALÓCZY, A et al. Pathways and mechanisms of offshore water intrusions on the Espírito Santo Basin shelf (188S–228S, Brazil). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 30 jul 2016. 30.

PEREIRA, Henrique P. P. Contribuições para o controle de Qualidade de dados de Boias Meteo-Oceanográficas na costa Brasileira, Rio de Janeiro, Junho 2015. 59.

PORTO DE SANTOS. **Porto de Santos**, 2023. Disponível em: <[www.portodedsantos.com.br](http://www.portodedsantos.com.br)>. Acesso em: 05 abril 2023.

PUPIN, Josiana R. Introdução às Séries e Transformadas de Fourier e, São Carlos, 20 dez. 2011. 82.

SAKAGAMI, Yoshiaki. Mapeamento do risco térmico em linha aéreas de transmissão com base em dados de modelo numérico atmosférico, Florianópolis, junho 2010. 99.

SILVA, Luciano P. D. **Circuito espacial produtivo do petróleo na Bacia de Santos e a economia política da Região Metropolitana da Baixada Santista**,2019.

SOUZA, Maria C. D. A. **A Corrente do Brasil ao Largo de Santos:** Medições diretas,2000.

UNESCO. Ocean Data Standards. **Recommendation for a Quality Flag Scheme for the Exchange of Oceanographic and Marine Meteorological Data**, Vol 3, 18 abr. 2013. 21p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV – Imprensa Universitária. 1991. 449 p.

YNOUE, Rita Y. et al. **Meteorologia noções básicas.**São paulo: Oficina de textos,2017.

ZHANG, Haifeng. Seasonal patterns of SST diurnal variation over the Tropical Warm Pool. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [S. l.], p. 8077-8094, 6 nov. 2016.