



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE *SQUALL* NAS BACIAS DE CAMPOS E
SANTOS**

Karine dos Santos Rodrigues

Orientadora: Prof.^a D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Coorientador: Prof. D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes

Rio de Janeiro, RJ

Dezembro, 2023

CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE *SQUALL* NAS BACIAS DE CAMPOS E
SANTOS

Karine dos Santos Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Mestre em Ciências** (área: Meteorologia).

Orientadores:

Prof.^a D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Prof. D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes

Rio de Janeiro, RJ

Dezembro, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

R18c Rodrigues, Karine dos Santos

 Caracterização de eventos de Squall nas Bacias de
Campos e Santos / Karine dos Santos Rodrigues. --
Rio de Janeiro, 2023.

 90 f.

 Orientadora: Ana Cristina Pinto de Almeida
Palmeira.

 Coorientadora: Wallace Figueiredo Menezes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do

 1. Squalls. 2. Bacia de Campos e Santos. 3.
Operações marítimas. I. Pinto de Almeida Palmeira,
Ana Cristina, orient. II. Figueiredo Menezes,
Wallace, coorient. III. Título.

CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE *SQUALL* NAS BACIAS DE CAMPOS E SANTOS

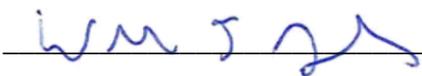
Karine dos Santos Rodrigues

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciências da área de Meteorologia. Submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovada em 15 de dezembro de 2023:



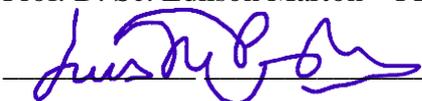
Profª. D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira – PPGM/UFRJ - Orientadora



Prof. D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes – PPGM/UFRJ - Coorientador



Prof. D. Sc. Edilson Marton – PPGM/UFRJ



D. Sc. Luís Manoel Paiva Nunes – PETROBRAS



Prof. D. Sc. Ricardo de Camargo – USP

Rio de Janeiro, RJ

Dezembro, 2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela orientação, força e sabedoria concedidas. Sua presença foi fundamental, iluminando os caminhos difíceis, me fortalecendo nos momentos de aflição e me ajudando a lidar com as minhas incertezas e angústias.

Ao meu marido e melhor amigo Igor França, por toda sua paciência, carinho, amor, conselhos e apoio. Você esteve ao meu lado nos momentos em que mais precisei; me ajudando a lidar com as minhas crises de ansiedade, com seu ombro amigo e palavras de conforto. Obrigada por não me deixar desistir! Te amo mais que tudo!

A minha amada família, em especial a minha mãe Ivaneide, meu padrinho Ivanildo, minha avó Ivanilda, minha madrinha Ivonete e meu irmão Leonardo, dedico uma gratidão que transcende as palavras. Obrigada pelo apoio inabalável, amor, compreensão e pelas orações. Sem vocês eu não seria nada! Meu amor por vocês é *forever*!

Aos meus orientadores, Ana Cristina Palmeira e Wallace Menezes, expresso minha profunda admiração e gratidão. Suas orientações, dedicação e paciência foram fundamentais para o progresso deste trabalho, ensinando-me a ser mais objetiva, a lidar com as minhas inseguranças, impondo limites às minhas “karinices” e evitando que eu me desviasse dos objetivos propostos. Essas contribuições não apenas moldaram esta dissertação, mas também influenciaram meu desenvolvimento tanto como pesquisadora quanto como indivíduo.

Ao querido amigo Luis Manoel, dedico minha sincera gratidão por sua valiosa contribuição, conselhos e apoio constante. Valorizo imensamente a sua boa vontade, gentileza e paciência demonstradas ao longo deste percurso. Os ensinamentos, ideias e sugestões que compartilhou desempenharam um papel crucial para o desenvolvimento, aprimoramento e sucesso desta pesquisa.

À Petrobras pela disponibilização dos dados observados e pelo apoio financeiro durante o mestrado, tornando esta pesquisa viável.

Aos profissionais Wellington, Eric, Andrioni, Karen, Gilmara, Henrique e Raquel pela gentileza e eficiência ao disponibilizarem informações relevantes para este estudo.

Aos meus amigos, Jamyle, Luiz Felipe e Ivan Pereira, por todo apoio e carinho. Vocês estiveram ao meu lado durante toda a minha jornada acadêmica, tornando-a mais significativa e enriquecedora.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Cada palavra de incentivo, cada conselho e cada gesto de apoio não passaram despercebidos.

“Os sonhos não determinam o lugar que você vai estar, mas produzem a força necessária para o tirar do lugar em que está.”

(Augusto Cury)

RESUMO

Squalls são fenômenos atmosféricos caracterizados por aumentos súbitos da velocidade do vento maior que 8 m/s e têm duração da ordem de minutos, similar a uma rajada de longa duração. Devido à sua imprevisibilidade e rapidez, elas podem representar uma potencial ameaça tanto para as operações marítimas dos setores de Óleo e Gás, transporte de cargas e turismo, quanto para diversas outras atividades no mar, incluindo riscos de acidentes ambientais, danos materiais e perigos à segurança humana. Embora a grande maioria dos estudos sobre *squalls* evidencie a existência desses eventos em latitudes médias e incluam o Sudeste do Brasil, mais especificamente as regiões das Bacias de Santos e de Campos, como uma região favorável a ocorrência de *squalls*, este tema ainda não foi suficientemente desenvolvido em pesquisas básicas ou aplicadas, e poucas são as informações e características conhecidas sobre estes eventos. Tendo em vista essa problemática, conduziu-se uma investigação com o propósito de identificar eventos de *squalls* nas Bacias de Campos e de Santos. Para atingir esse objetivo, utilizaram-se séries temporais de velocidade e direção do vento medidas por três anemômetros localizados na região de interesse. Esses dados foram empregados na identificação e caracterização de eventos de *squall*, levando em consideração aspectos relevantes como a intensidade (velocidade inicial e incremento da velocidade do vento), direção (mudanças de direção do vento), tempo de duração, tempo de subida (período de aumento da velocidade do vento), entre outros. Essas características permitiram a identificação de 17 eventos de *squall*, com valores máximos de velocidades alcançando até 30 m/s e taxas de variações de $2,7 \text{ m.s}^{-1}/\text{min}$ para o caso mais significativo. Além disso, observou-se que na área de estudo, as *squalls* podem se manifestar em qualquer direção, sendo acompanhadas ou não por mudanças na direção do vento e caracterizam-se por tempos de subida curtos, uma média de aproximadamente 14,6 minutos, e uma duração típica de cerca de 1 hora, mas algumas delas podem se prolongar por mais de 2 horas. A análise visual das séries temporais das *squalls*, permitiu a detecção de seis modelos de *squall*, sendo o tipo “pico isolado” o mais comum, representando 41,2% dos casos. Esses eventos se destacaram ao apresentar tempos de subida e descida muito breves, taxas de variação de velocidade mais elevadas e notáveis variações na direção do vento em comparação com os demais tipos identificados. Por fim, vale ressaltar que os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam a ocorrência e frequência de eventos de *squall* na região das Bacias de Campos e de Santos e contribuem de forma significativa para o desenvolvimento e/ou aprimoramento de projetos *offshore*.

Palavras-chave: *Squalls*, Bacias de Campos e Santos, operações marítimas.

ABSTRACT

Squalls are atmospheric phenomena characterized by sudden increases in wind speed greater than 8 m/s and last on the order of minutes, similar to a long-lasting gust. Due to their unpredictability and rapidity, they can represent a potential threat both to maritime operations in the Oil & Gas, cargo transportation and tourism sectors, as well as to several other activities at sea, including risks of environmental accidents, material damage and dangers to human security. Although the vast majority of studies on squalls show the existence of these events in mid-latitudes and include Southeast Brazil, more specifically the Santos and Campos Basin regions, as a region favorable to the occurrence of squalls, this topic has not yet been sufficiently developed in basic research. or applied, and little information and characteristics are known about these events. In view of this problem, an investigation was conducted with the purpose of identifying squall events in the Campos and Santos Basins. To achieve this objective, time series of wind speed and direction measured by three anemometers located in the region of interest were used. These data were used to identify and characterize squall events, taking into account relevant aspects such as intensity (initial speed and increase in wind speed), direction (changes in wind direction), duration time, rise time (period increase in wind speed), among others. This characteristics allowed the identification of 17 squall events, with maximum speed values reaching up to 30 m/s and variation rates of $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{min}$ for the most significant case. Furthermore, it was observed that in the study area, squalls can manifest in any direction, being accompanied or not by changes in wind direction and are characterized by short rise times, an average of approximately 14.6 minutes, and a typical duration of about 1 hour, but some of them can last more than 2 hours. Visual analysis of the squall time series allowed the detection of six squall models, with the “isolated peak” type being the most common, representing 41.2% of cases. These events stood out for presenting very brief rise and fall times, higher rates of speed variation and notable variations in wind direction compared to the other types identified. Finally, it is worth highlighting that the results obtained in this research confirm the occurrence and frequency of squall events in the Campos and Santos Basins region and contribute significantly to the development and/or improvement of offshore projects.

Keywords: Squalls, Campos and Santos Basins, maritime operations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de modelos de <i>squalls</i> : pico isolado, pico duplo, decaimento lento, topo plano, contínuo e escada. Adaptado de Lu, Osaki e Wada (2017).....	5
Figura 2.2 - Séries temporais de intensidade do vento (m/s) para exemplificar as <i>squalls</i> do: (a) tipo pico isolado, (b) tipo pico duplo, (c) tipo decaimento lento, (d) tipo topo plano, (e) tipo contínuo e (f) tipo escada. Adaptado de Lu, Osaki e Wada (2017).....	6
Figura 2.3 - Exemplificação dos tipos de <i>squalls</i> : (a) Tipo 1; (b) Tipo 2; (c) Tipo 3; (d) Tipo 4. Adaptado de Brown <i>et al.</i> (2016).....	7
Figura 2.4 - Representação das mudanças na condição de vento e temperatura do ar para <i>squalls</i> causadas por: (a) uma linha de instabilidade pré-frontal (Modelo A) e (b) por outro sistema convectivo de mesoescala (Modelo B). Adaptado de Lu e Osaki (2015).....	8
Figura 2.5 - Mapa dos principais locais de ocorrências de <i>squalls</i> , destacando o número de eventos documentados em cada região.....	9
Figura 3.1 - Localização das Bacias de Campos e de Santos. A linha amarela marca a delimitação das Bacias.....	14
Figura 3.2 - Localização dos anemômetros das Plataformas P-57, P-48 e Navio Sonda NS-44 na região da Bacias de Campos e de Santos.....	15
Figura 3.3 - Fluxograma com as principais etapas da metodologia da pesquisa.....	19
Figura 3.4 - Esquema exemplificando o método utilizado para corrigir a direção do vento para o Norte Verdadeiro (Nv).....	21
Figura 3.5 - Representação dos parâmetros adotados na caracterização de <i>squalls</i>	23
Figura 3.6 - Exemplificação do método para definição do início e da velocidade de pico da <i>squall</i> . Nesta representação gráfica, os pontos A, B e C correspondem às opções de início da <i>squall</i> , enquanto os pontos D e E são os possíveis picos. As distâncias horizontais, ou seja, as distâncias no tempo (tempo de subida, em minutos), são referidas como ADH, BDH, CDH, AEH, BEH e CEH, e as distâncias verticais (variação da velocidade do vento, em $m.s^{-1}$) são indicados por ADV, BDV, CDV, AEV, BEV e CEV.....	24
Figura 3.7 - Exemplo de Diagrama termodinâmico Skew-T Log P com os perfis verticais de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, ilustrando o cálculo da DCAPE (correspondente a área sombreada em azul). A linha vermelha marca o limite superior (Z).	

Imagem baseada na sondagem das 00Z do dia 23/07/2011 para Amarillo, Texas. Fonte: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html (Acessado pela última vez em outubro de 2023).....	32
Figura 4.1 - Evolução temporal da intensidade do vento ($m.s^{-1}$ - linha azul) do P-48 - para o dia 24 de Junho de 2020 no intervalo de 07Z às 13Z - caso 10. O retângulo vermelho destaca o período anterior a <i>squall</i> onde a velocidade do vento apresentou valores aproximadamente constantes.....	38
Figura 4.2 - Evolução temporal da intensidade do vento ($m.s^{-1}$ - linha azul): (a) P-48 - para às 18Z do dia 21/08/2019 até às 15Z do dia 22/08/2019 - caso 04. (b) P-57 - para o dia 28/04/2021 no intervalo de 00Z às 07Z - caso 15. O círculo vermelho destaca o período pré- <i>squall</i>	39
Figura 4.3 - Percentual e número de ocorrência de <i>squalls</i> (entre parênteses) do tipo Pico isolado, Pico duplo, Topo plano, Contínuo, Escada e Decaimento lento.....	42
Figura 4.4 - Evolução temporal da intensidade do vento ($m.s^{-1}$ - linha azul) e direção do vento (graus - linha vermelha) para exemplificar as <i>squalls</i> do tipo: (a) pico isolado - caso 1, (b) pico isolado - caso 2, (c) pico isolado - caso 3, (d) decaimento lento - caso 4, (e) decaimento lento - caso 5, (f) decaimento lento - caso 6, (g) pico isolado - caso 7, (h) contínuo - caso 8, (i) escada - caso 9, (j) pico isolado - caso 10, (k) pico isolado - caso 11, (l) topo plano - caso 12, (m) topo plano - caso 13, (n) pico duplo - caso 14, (o) decaimento lento - caso 15, (p) topo plano - caso 16. Continua.....	43
Figura 4.5 - Evolução temporal da intensidade do vento ($m.s^{-1}$ - linha azul) e direção do vento (graus - linha vermelha) do NS-44 - para o dia 09 de Abril de 2022 no intervalo de 20Z às 22Z.....	47
Figura 4.6 - 09 de abril de 2022 às 12Z (a) imagem de satélite no canal do infravermelho (canal 13) e (b) carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil. Fonte: DHN.....	48
Figura 4.7 - PNMM (hPa) em linhas e Vorticidade Relativa ($10^{-5} s^{-1}$) em 1000 hPa em tons de azul para o dia 09 de abril de 2022 às 12Z. O quadrado vermelho indica a região de formação da baixa pressão.....	48
Figura 4.8 - 09 de abril de 2022 às 21Z. (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho (canal 13); (b) PNMM (hPa) em linhas e VR ($10^{-5} s^{-1}$) em 1000 hPa em tons de azul; (c) Vento (m/s) em linha de corrente e umidade específica (g/kg) em 850 hPa; (d) Vento a 10 m (kt) em barbela e Vorticidade Relativa ($10^{-4} s^{-1}$) em 1000 hPa em tons de azul e verde. O ponto em vermelho	

indica o local de ocorrência da <i>squall</i> , enquanto o retângulo vermelho delimita a região do cavado em baixos níveis.....	50
Figura 4.9 - (a) Magnitude do vento (m/s) em tons de verde e componente meridional do vag em setas roxas para o nível de 200 hPa. (b) Divergência do vento (10^{-5} s^{-1}) em 200 hPa em sombreado, para o dia 09 de abril de 2022 às 21Z. O ponto em vermelho indica a posição do cavado em baixos níveis.....	51
Figura 4.10 - 09 de abril de 2022. (a) TSM MUR ($^{\circ}\text{C}$) sombreado colorido. (b) Anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$) em tons de azul e vermelho. O ponto em preto indica o local de ocorrência da <i>squall</i>	52
Figura 4.11 - Diagrama Skew-t Log P para o dia 09 de abril de 2022 às 12Z. Radiossondagem do SBGL (22,81 $^{\circ}\text{S}$ / 043,25 $^{\circ}\text{W}$) a partir do <i>Software</i> RAOB do Alerta Rio. A elipse azul destaca a camada seca em níveis médios.....	53
Figura 4.12 - Diagramas Skew-t Log P gerados a partir de informações da reanálise ERA5 para o dia 09 de abril de 2022 às: (a) 12Z - para a região onde a tempestade teve o seu disparo (24,50 $^{\circ}\text{S}$ / 044,50 $^{\circ}\text{W}$) e (b) 20Z - para o local onde ocorreu a <i>squall</i> (24,75 $^{\circ}\text{S}$ / 042,75 $^{\circ}\text{W}$). A elipse preta destaca a camada seca em níveis médios e altos.....	54
Figura 4.13 - CAPE (J.kg^{-1}) acima de 500 J.kg^{-1} sombreado em tons de vermelho e linhas em preto, para o dia 09/04/2022 às: (a) 12Z e (b) 20Z. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da <i>squall</i>	55
Figura 4.14 - Índice TT ($^{\circ}\text{C}$) acima de 30 $^{\circ}\text{C}$ sombreado em tons de azul e linhas em preto (Linha superior) e Índice K ($^{\circ}\text{C}$) acima de 26 $^{\circ}\text{C}$ sombreado em tons de verde e linhas em preto (Linha inferior). Para o dia 09/04/2022 às: (a) e (c) 12Z e (b) e (d) 20Z. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da <i>squall</i>	57
Figura 4.15 - Perfil Longitudinal de Umidade Relativa (%) para o dia 09 de abril de 2022 as 20Z, latitude 24,75 $^{\circ}\text{S}$	58
Figura 4.16 - Perfil Longitudinal de Umidade Específica (g/kg) para o dia 09 de abril de 2022 as 20Z, latitude 24,75 $^{\circ}\text{S}$	59
Figura 4.17 - (a) Índice KO (K) abaixo de -1K sombreado em tons de roxo e linhas em preto e (b) Índice SHEAR acima de 6 m.s^{-1} sombreado em tons de verde e azul e linhas em preto (m.s^{-1}), para o dia 09/04/2022 às 20Z. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da <i>squall</i>	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo dos critérios de seleção de <i>squalls</i>	4
Tabela 3.1 - Casos de <i>squall</i> e as séries temporais de intensidade e direção do vento para os anemômetros localizados nas plataformas P-57, P-48 e NS-44. O formato da data segue a ordem dia, mês e ano, enquanto o da hora é apresentado em horas, minutos e segundos. Os horários estão expressos em UTC (<i>Coordinated Universal Time</i>).....	17
Tabela 3.2 - Valores de CAPE e seu potencial para tempestades severas. Fonte: Nascimento, 2005.....	28
Tabela 3.3 - Valores do Índice <i>Total Totals</i> e seu potencial para tempestades. Fonte: Adaptado de Nascimento, 2005.....	28
Tabela 3.4 - Potencial para tempestades em função dos valores do índice K. Fonte: Hallak e Pereira Filho, 2012.....	29
Tabela 4.1 - Parâmetros relacionados à intensidade do vento das <i>squalls</i> : velocidade inicial (v_0), velocidade de pico (v_p), velocidade máxima (v_{max}) e variação da velocidade (Δv), em m/s, e a taxa de variação da velocidade do vento (a), em $m.s^{-1}/min$, considerando os 17 casos identificados e suas respectivas localidades. Os destaques em vermelho são os parâmetros que não atingiram os critérios da OMM (WMO, 1962).....	35
Tabela 4.2 -Parâmetros relacionados à duração das <i>squalls</i> : Data de início (Data_início), tempo inicial (t_0), tempo de pico (t_p), tempo de máxima velocidade (t_{max}), tempo de subida (t_r) e tempo de descida (t_d), em minutos, data do fim (Data_fim), tempo final (t_f) e duração (t), em minutos. Considerando os 17 eventos de <i>squalls</i> identificados e suas respectivas localidades. Os horários estão expressos em UTC (<i>Coordinated Universal Time</i>). O formato da data segue a ordem dia, mês e ano, enquanto o da hora é apresentado em minutos e segundos.....	37
Tabela 4.3 - Parâmetros relacionados à direção do vento. A Direção da <i>Squall</i> [Norte (N), Nordeste (NE), Leste (E), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SW), Oeste (W) e Noroeste (NW)]. Tipo de variação: estável (sem variação significativa), durante (durante a variação da velocidade do vento), antes + durante (mudança complementar) e antes / durante (mudança não-complementar). dirantes e dirdurante: variação da direção para, respectivamente, 30 minutos antes e durante o evento de <i>squall</i> , em graus. maxdirantes e maxdirdurante: taxa máxima de variação da direção para, respectivamente, 30 minutos antes e durante o evento de <i>squall</i> , em	

graus por minuto. dirtotal: variação total da direção do vento, em graus. Considerando os 17 eventos de *squalls* identificados e suas respectivas localidades.....41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMSR-E	<i>Advanced Microwave Scanning Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CAPE	<i>Convective Available Potential Energy</i>
CFSv2	<i>Climate Forecast System Version 2</i>
DCAPE	<i>Downdraft CAPE</i>
E	Leste
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENE	Leste-Nordeste
ERA5	<i>5th Generation of ECMWF ReAnalysis</i>
FLNG	<i>Floating Liquefied Natural Gas</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
GHRSSST	<i>Group for High Resolution Sea Surface Temperature</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JAN	Jato de Altos Níveis
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
K	<i>Index K</i>
KO	<i>Konvektiv Index</i>
LIs	Linhas de Instabilidade
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>

N	Norte
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCE	Nível de Convecção Espontânea
NCEI	<i>National Centers for Environmental Information</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NE	Nordeste
NEL	Nível de Equilíbrio
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NW	Noroeste
OISST	<i>Optimum Interpolation Sea Surface Temperature</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
RAOB	<i>RAwinsonde OBservation</i>
RJ	Rio de Janeiro
S	Sul
SBGL	Aeroporto Internacional do Galeão
SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SE	Sudeste
SHEAR	Cisalhamento vertical do vento na baixa troposfera
SP	São Paulo
SW	Sudoeste

TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TSM MUR	<i>Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature</i>
TT	<i>Total Totals Index</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
VR	Vorticidade Relativa
W	Oeste
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Estrutura da Dissertação	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 <i>Squalls</i>	3
2.1.1 Definição	3
2.1.2 Características gerais	3
2.1.3 Classificação	4
2.1.3.1 Quanto a configuração da série temporal	5
2.1.3.2 Quanto ao tempo de crescimento e duração	6
2.1.3.3 Quanto ao fenômeno associado	7
2.1.4 Ocorrências documentadas	8
2.2 Sistemas associados ao desenvolvimento de <i>squalls</i>	11
2.2.1 Tempestades em Mesoescala	11
2.2.1.1 Linhas de Instabilidade	12
2.2.2 <i>Downbursts</i>	13
CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA.....	14
3.1 Área de estudo	14
3.2 Dados.....	15
3.2.1 Dados observados	15
3.2.2 TSM MUR	17
3.2.3 TSM NOAA.....	18
3.2.4 Reanálise ERA5	18
3.3 Métodos	18
3.3.1 Pré-processamento dos dados observados.....	20
3.3.2 Caracterização das <i>Squalls</i>	21
3.3.3 Estudo de caso.....	25
3.4 Índices atmosféricos.....	27
3.4.1 CAPE.....	27
3.4.2 Índice <i>Total Totals</i>	28

3.4.3 Índice K	29
3.4.4 Índice KO	30
3.4.5 DCAPE	30
3.4.6 SHEAR	32
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 Análise das características das <i>squalls</i>	34
4.1.1 Intensidade do vento.....	34
4.1.2 Direção do vento	39
4.2 Classificação das <i>squalls</i>	42
4.3 Estudo de caso	46
4.3.1 Análise sinótica	47
4.3.2 Análise termodinâmica.....	52
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	61
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	63
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Squalls são fenômenos pouco estudados no Brasil, caracterizados por um aumento repentino da velocidade do vento e podem influenciar as operações no mar com potencial de danos ambientais, materiais e de segurança, além de afetar as operações de atracação.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1962), o termo *squall* é um rápido aumento na velocidade do vento de no mínimo 8 m/s, sustentado acima de 11 m/s por pelo menos 1 (um) minuto. Além disso, segundo Duggal *et al.* (2011), as *squalls* podem atingir uma velocidade máxima do vento de até 50 m/s e decaem para baixas velocidades em um intervalo de 60 a 90 minutos, ou seja, não podem ser confundidas com as rajadas. A rajada é uma rápida flutuação da velocidade do vento e sua duração é, geralmente, inferior a 20 segundos (Azad; Alam, 2010).

Mais especificamente, *squalls* são eventos de fortes ventos transitórios que podem ser gerados e/ou acompanhados por tempestades; ou seja, “*squall*” não é tempestade e também não é rajada. Logo o termo “*squall line*” não é equivalente a “*squall*”, uma vez que *squall line* (também conhecida como linha de instabilidade em português - Hane, 1986) é uma estreita faixa de tempestades dispostas de forma alinhada (Lutgens; Tarbuck; Tusa, 1995).

Vale destacar que as *squalls* causaram muitos acidentes, como o do navio de cruzeiro *Eastern Star*, que virou e afundou durante um episódio de *squall* no rio Yangtzé, na China ocorrido no dia 01 de junho de 2015 (Cao *et al.*, 2018) e que deixou 431 mortos, segundo a reportagem do G1 (G1 Globo, 2023).

Outro incidente de destaque ocorreu devido a uma *squall* extremamente forte, com ventos superiores a 30 m/s, no Golfo do México, em 03 de abril de 2013, no qual além da intensidade do vento, a direção mudou rapidamente. Segundo Jeans *et al.* (2014) esse episódio foi considerado bastante raro (provavelmente um evento de 100 anos). Durante esse episódio, uma plataforma de perfuração em águas profundas precisou realizar uma desconexão de emergência para garantir a segurança da operação.

Além disso, é importante salientar que os eventos de *squalls* são recorrentes nos Oceanos Atlântico e Pacífico tanto em regiões tropicais quanto em latitudes médias; a exemplo disso, Lu, Osaki e Wada (2017) enfatizam a ocorrência de *squalls* em regiões de latitude média, incluindo o Hemisfério Norte - Japão, o Sul dos Estados Unidos e o Hemisfério Sul - o Sudeste do Brasil.

No Sudeste do Brasil, mais especificamente a região das Bacias de Santos e de Campos, chama a atenção pelo desenvolvimento oceânico de petróleo e gás, porém o tema *squalls* ainda

é pouco explorado na literatura (provavelmente por falta de conhecimento do fenômeno). Ainda assim, Lu e Osaki (2015) destacam que esta região possui um ambiente favorável para a formação de linhas de instabilidade e podem trazer fortes eventos de *squall*.

Tendo em vista a relevância que a ocorrência de *squalls* representa para a segurança de unidades marítimas e operações no mar, torna-se importante estudar estes fenômenos, contemplando tanto projetos de navios e plataformas como também as atividades operacionais, para entender os riscos potenciais das *squalls* para a indústria do petróleo, bem como para confirmar a sua ocorrência e frequência na região das Bacias de Santos e de Campos.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é investigar eventos de *squall* nas Bacias de Santos e de Campos e identificar as suas características peculiares.

Em síntese, os objetivos específicos são:

1. Quantificar o quão alto são os valores das *squalls* e confirmar a sua existência, considerando os limiares para definir a ocorrência ou não do evento;
2. Caracterizar as condições atmosféricas, sinóticas e de mesoescala, de um caso de *squall* significativo pré-selecionado, procurando destacar os mecanismos dinâmicos e termodinâmicos associados ao seu desenvolvimento.

1.2 Estrutura da Dissertação

Além do capítulo introdutório, este trabalho tratará no Capítulo 2 da revisão teórica abrangente sobre o tema, explorando os seus conceitos e características. Além disso, destaca-se a análise de trabalhos anteriores relevantes, com enfoque nos principais locais de ocorrência de *squalls* e nos sistemas de mesoescala associados ao desenvolvimento desses eventos. No Capítulo 3 é apresentada a área de estudo e detalhada a metodologia adotada, incluindo a seleção dos casos estudados, e as diferentes fontes de dados que foram utilizadas no decorrer da pesquisa. Os resultados obtidos são mostrados e discutidos no Capítulo 4, enquanto que no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, finalizando o Capítulo 6 com as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão da literatura sobre as *squalls*, destacando a sua definição, as características gerais, alguns estudos relacionados com esse tipo de evento, e também os principais sistemas de mesoescala que contribuem para a sua formação e desenvolvimento.

2.1 *Squalls*

2.1.1 Definição

Na literatura científica são encontradas diversas definições para *squall*; conforme a *American Meteorological Society*, *squall* é um forte vento caracterizado pelo início repentino, uma duração da ordem de minutos e uma diminuição repentina da velocidade. Para o *National Weather Service*, é reportada apenas quando a velocidade do vento for maior que 8 m/s (16 nós) e for sustentada por pelo menos 2 minutos (para distinguir de rajadas). Para o uso marítimo, o termo “*squall*” é uma tempestade local severa considerada como um todo; isto é, ventos, nuvens, precipitação, trovões e relâmpagos (se houver).

De acordo com a escala Beaufort, “*squall* é um aumento súbito da velocidade do vento em pelo menos três estágios da escala Beaufort, a velocidade subindo para força 6 ou mais e durando pelo menos um minuto” (Das *et al.*, 2015).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM - em inglês *World Meteorological Organization* [WMO, 1962]): “*squall* é um rápido aumento na velocidade do vento de no mínimo 8 m/s, sustentado acima de 11 m/s por pelo menos 1 (um) minuto”. Na edição de 2019, a OMM (WMO, 2019) definiu a *squall* como um fenômeno atmosférico caracterizado por uma grande variação da velocidade do vento: começa repentinamente, tem duração da ordem de minutos e diminui a velocidade bruscamente. Muitas vezes é acompanhada por precipitação ou trovoada.

2.1.2 Características gerais

O histórico de eventos de *squall* ao redor do mundo mostra que tais fenômenos são iniciados com um aumento acentuado na velocidade do vento a partir de um vento de fundo (vento ambiental ou da região onde ela se encontra), uma velocidade de pico sustentada por um período relativamente curto e, em seguida, um decaimento lento.

As *squalls* atingem rapidamente uma velocidade máxima do vento de até 50 m/s e depois decaem para baixas velocidades em um intervalo de 60 a 90 minutos (Duggal *et al.*, 2011). Além disso, o aumento na velocidade do vento é de pelo menos 8 m/s em 20 minutos (Brown *et al.*, 2017) e possuem ao menos velocidade de pico de 11 m/s (WMO, 1962).

A duração mínima de uma *squall* é de 1 (um) minuto e menor que 2 (duas) horas (Oberlies; Bhattacharjee; He, 2017), sendo a sua duração típica de aproximadamente 1 (uma) hora, de acordo com o padrão DNV-OS-E301 da *Det Norske Veritas* [DNV, 2008].

Em alguns casos, além do aumento da velocidade do vento, ao mesmo tempo a direção do vento muda rapidamente até 180 graus (Lu; Osaki, 2015). Ademais, podem ocorrer reduções na temperatura e na pressão atmosférica (Lu; Osaki; Wada, 2017) e aumentos na umidade do ar (Jeans *et al.*, 2008).

Os critérios essenciais (principais) e suplementares (secundários) de seleção de *squalls* mencionadas nesta seção estão resumidos na Tabela 2.1 abaixo:

Tabela 2.1 - Resumo dos critérios de seleção de *squalls*.

Critérios principais
Velocidade de pico > 11 m/s (WMO, 1962)
Velocidade máxima \leq 50 m/s (Duggal <i>et al.</i> , 2011)
Taxa de variação da velocidade do vento de 8 m/s em 20 minutos (Brown <i>et al.</i> , 2017)
Tempo de decaimento entre 60 e 90 minutos (Duggal <i>et al.</i> , 2011)
Duração (t): 1minuto \leq t < 2 horas (Oberlies; Bhattacharjee; He, 2017)
Critérios secundários
Mudança na direção do vento \leq 180 graus (Lu; Osaki, 2015)
Reduções na temperatura e na pressão atmosférica (Lu; Osaki; Wada, 2017)
Aumento na umidade do ar (Jeans <i>et al.</i> , 2008).

2.1.3 Classificação

Diversas formas de classificar *squalls* estão presentes na literatura, que levam em consideração características específicas desse fenômeno. A seguir, serão apresentadas essas diferentes classificações.

2.1.3.1 Quanto a configuração da série temporal

Lu, Osaki e Wada (2017), ao analisarem episódios de *squalls* em Ilhas remotas próximas à Costa do Japão, descrevem seis tipos de modelos de *squall* (ver Figura 2.1). Essas categorias foram definidas com base nas mudanças na velocidade do vento e na aparência visual da série temporal de intensidade do vento, e são denominadas conforme abaixo:

1. **Pico isolado:** caracterizado por uma rápida variação da velocidade do vento, seguida por uma queda abrupta (Figura 2.2-a). As *squalls* do tipo pico isolado são as mais recorrentes e costumam ser aquelas com mudanças expressivas na direção do vento;
2. **Pico duplo:** apresenta duas mudanças bruscas na velocidade do vento, separadas por um período de vento mais fraco (Figura 2.2-b);
3. **Decaimento lento:** marcado por uma variação gradual na velocidade do vento, e posteriormente, por uma lenta diminuição (Figura 2.2-c);
4. **Topo plano:** caracterizado por uma mudança abrupta na velocidade do vento, seguida por um período de vento constante e após, a velocidade diminui repentinamente (Figura 2.2-d);
5. **Contínuo:** a velocidade do vento aumenta e depois se mantém inalterada (constante) por muito tempo (Figura 2.2-e);
6. **Escada:** caracterizado por uma série de mudanças repentinas na velocidade do vento. A forma da curva de velocidade do vento se assemelha a uma escada (Figura 2.2-f).

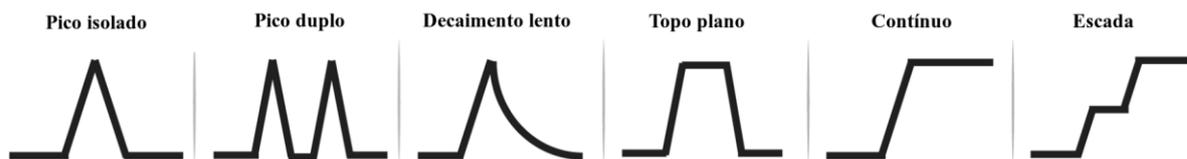


Figura 2.1 - Tipos de modelos de *squalls*: pico isolado, pico duplo, decaimento lento, topo plano, contínuo e escada. Adaptado de Lu, Osaki e Wada (2017).

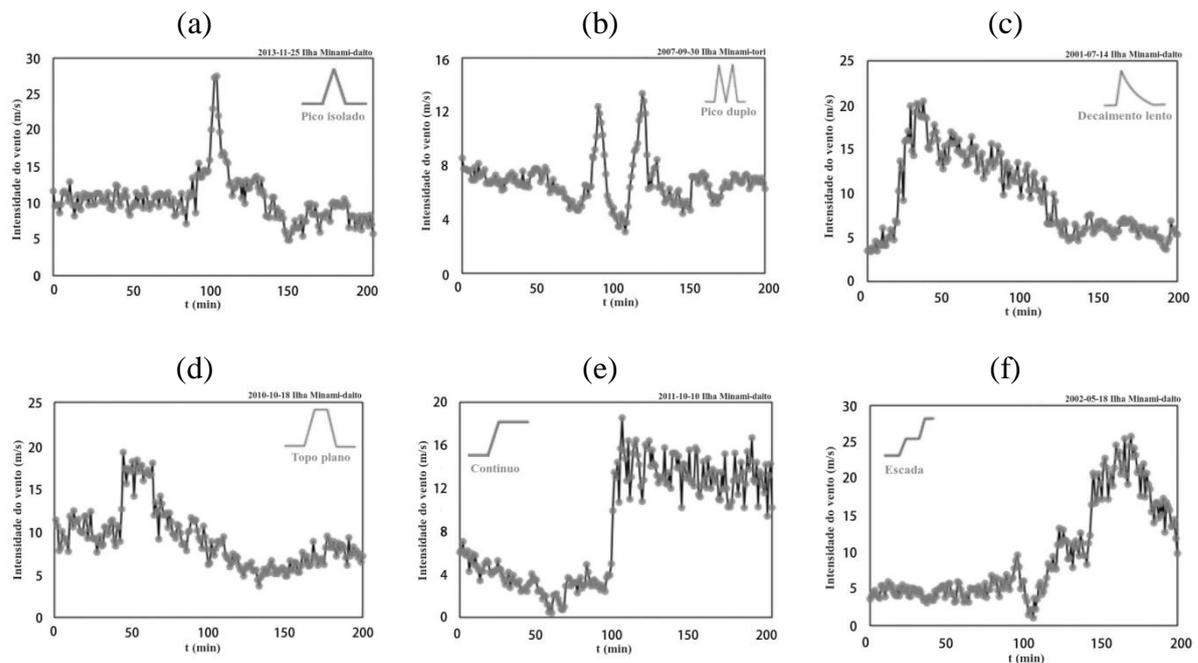


Figura 2.2 - Séries temporais de intensidade do vento (m/s) para exemplificar as *squalls* do: (a) tipo pico isolado, (b) tipo pico duplo, (c) tipo decaimento lento, (d) tipo topo plano, (e) tipo contínuo e (f) tipo escada.

Adaptado de Lu, Osaki e Wada (2017).

Adicionalmente, Naciri e Chitrapu (2019) enfatizam que a maioria das *squalls* possuem um único pico (tipo pico isolado), enquanto algumas apresentam dois picos (tipo pico duplo). Contudo, é possível ocorrer três picos consecutivos com magnitudes decrescentes.

2.1.3.2 Quanto ao tempo de crescimento e duração

Brown *et al.* (2016) examinaram um banco de dados contendo 242 eventos de *squall* que ocorreram na África Ocidental durante um período de 4 anos e 10 meses. Como resultados dessa análise, os autores identificaram 4 (quatro) tipos diferentes de *squalls* com base na rapidez com que atingem altas velocidades (tempo de crescimento) e na duração total do evento, sendo eles:

- Tipo 1 - são marcadas por um início rápido e uma duração estendida de 1 hora ou mais e precedidas por condições estáveis ou calmaria (Figura 2.3-a);
- Tipo 2 - possuem um início rápido, curta duração e apresentam mudanças significativas na direção do vento (Figura 2.3-b). Além disso, a velocidade do vento permanece alta por um certo tempo (cerca de 30 minutos) antes de diminuir gradualmente;
- Tipo 3 - conhecidas como “*Squalls* severas”, tem um início muito rápido, curtíssima duração e apresentam valores de pico de velocidade do vento elevados que costumam

exceder 20 m/s, mas não são sustentados (Figura 2.3-c). Em geral, possuem baixas velocidades do vento antes do início da *squall*, mas não apresentam necessariamente uma mudança de direção;

- Tipo 4 - apresentam início lento, duração estendida de mais de 1 hora e não apresentam necessariamente uma mudança de direção (Figura 2.3-d). Elas são caracterizadas por ventos fortes e variáveis, mas não têm o mesmo aumento rápido na velocidade do vento e mudança de direção como nos tipos 1, 2 e 3.

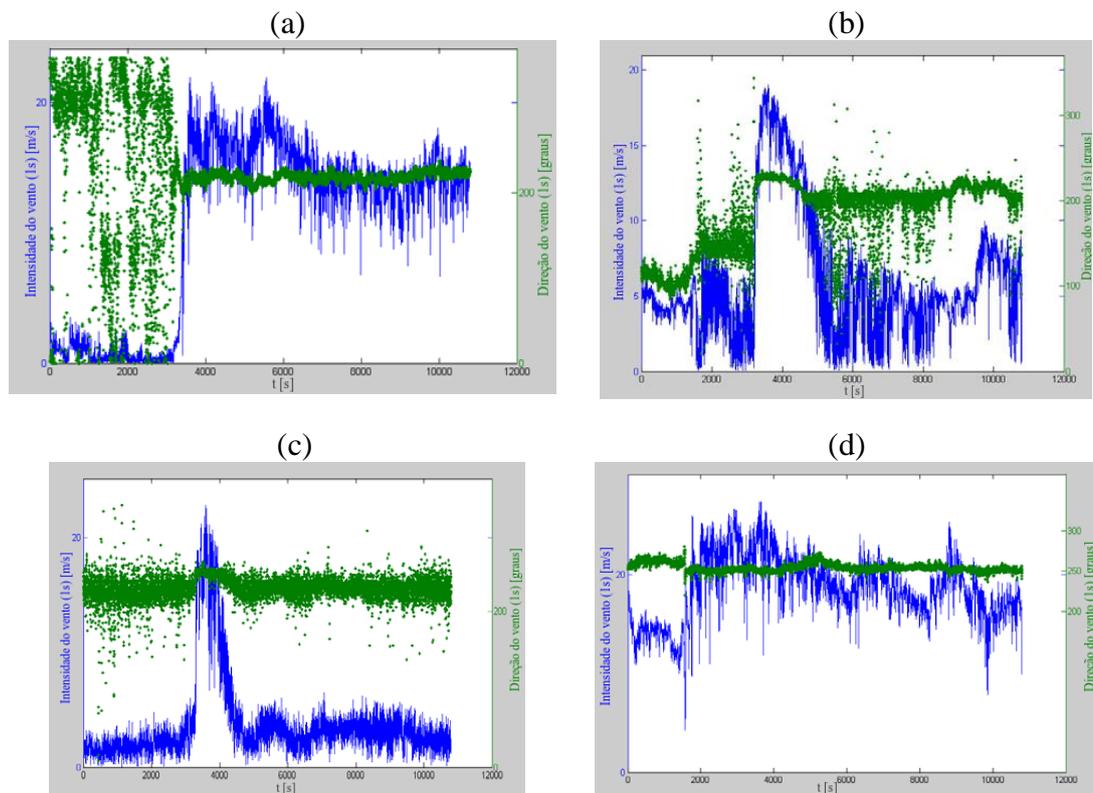


Figura 2.3 - Exemplificação dos tipos de *squalls*: (a) Tipo 1; (b) Tipo 2; (c) Tipo 3; (d) Tipo 4.

Adaptado de Brown *et al.* (2016).

Esses tipos de *squalls* são importantes para entender como elas afetam a resposta do navio e como os projetistas podem levar em conta esses fatores ao projetar sistemas de amarração.

2.1.3.3 Quanto ao fenômeno associado

Lu e Osaki (2015) ao investigarem possíveis ocorrências de *squalls*, em áreas de desenvolvimento oceânico de latitudes médias, encontraram características diferentes entre

squalls causadas pela linha de instabilidade pré-frontal (na dianteira da frente fria) e aquelas desencadeadas por outro sistema meteorológico.

Para as *squalls* desencadeadas pela linha de instabilidade pré-frontal (Modelo A - Figura 2.4-a), a velocidade do vento aumentou e diminuiu de forma repentina. Ademais, a direção do vento e a temperatura também mudaram ao mesmo tempo, a temperatura diminuiu e a direção do vento mudou consideravelmente.

Por outro lado, para *squalls* causadas por outro tipo de sistema convectivo de mesoescala em vez da linha de instabilidade (Modelo B - Figura 2.4-b), a velocidade do vento mudou repentinamente e, ao atingir o pico, continuou com a velocidade alta por um longo tempo e a direção mudou antecipadamente.

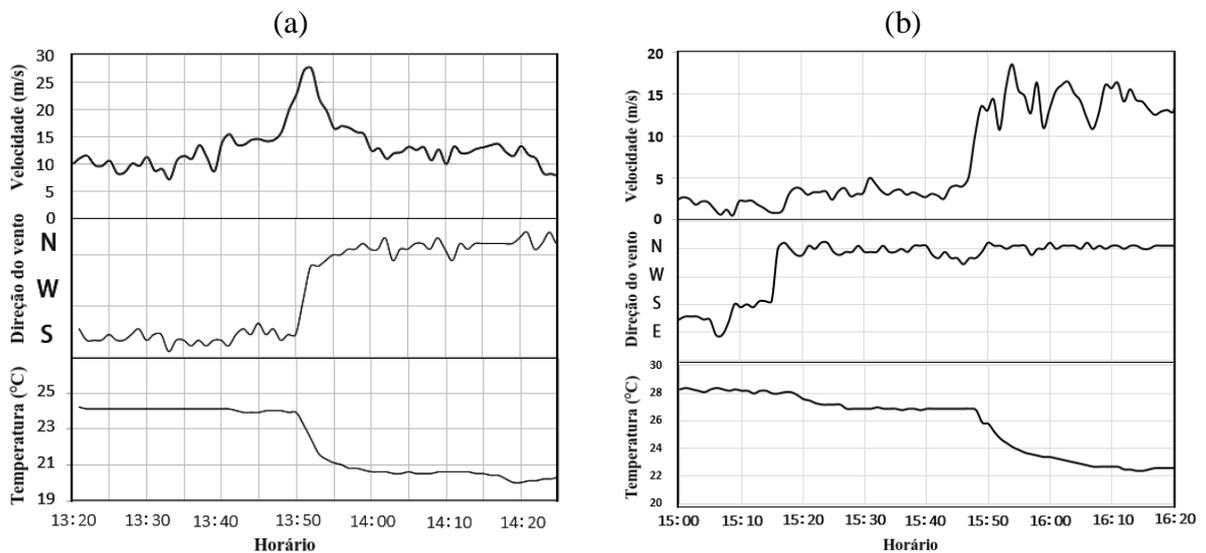


Figura 2.4 - Representação das mudanças na condição de vento e temperatura do ar para *squalls* causadas por:

(a) uma linha de instabilidade pré-frontal (Modelo A) e (b) por outro sistema convectivo de mesoescala

(Modelo B). Adaptado de Lu e Osaki (2015).

2.1.4 Ocorrências documentadas

As *squalls* são observadas em uma ampla faixa de latitudes ao redor do mundo, com ocorrências documentadas em diversas regiões, incluindo a Costa Oeste da África, alguns países da África Central (Angola e República Democrática do Congo), o mar da China Meridional, o Japão, o Golfo do México, o Noroeste da Austrália, a Ásia Meridional, entre outras (ver Figura 2.5).

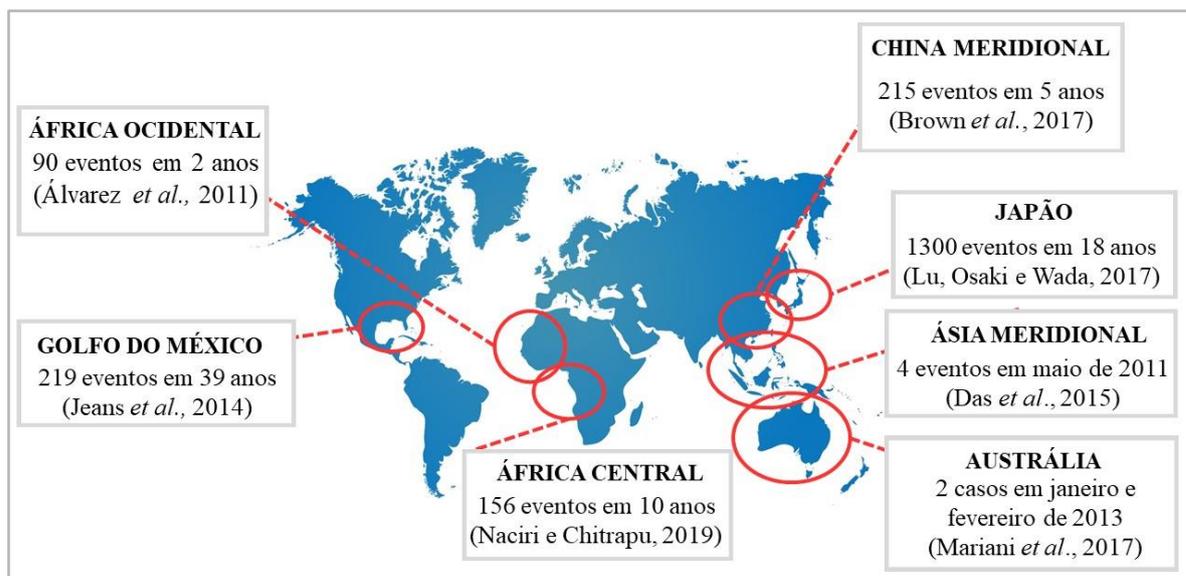


Figura 2.5 - Mapa dos principais locais de ocorrências de *squalls*, destacando o número de eventos documentados em cada região.

Na região da Costa Oeste da África, que engloba países como Senegal, Gâmbia, Mauritânia, Mali, Costa do Marfim, Nigéria, Golfo da Guiné, entre outros, as *squalls* fazem parte da realidade climática de muitas dessas nações e dominam alguns aspectos de projeto e operação de instalações no mar.

Nesse contexto, Álvarez *et al.* (2011) introduziram uma metodologia para o desenvolvimento de projetos de estruturas flutuantes (FPSO - *Floating Production Storage and Offloading*) baseada em resposta para análise de sistemas de ancoragem sob condições de *squall*. No decorrer desse estudo, foram utilizados registros de vento focado no ambiente do Golfo da Guiné. Para uma análise mais detalhada, a área foi dividida em duas zonas: Norte (Nigéria) e Sul (Congo, Angola). Através dessa abordagem, foi possível identificar 90 eventos de *squall* para a zona Norte e 115 ocorrências para a zona Sul da região do Golfo da Guiné, por uma duração acumulada de aproximadamente 2 e 6,5 anos, respectivamente.

Minnebo *et al.* (2012) realizaram uma pesquisa análoga acerca dos sistemas de ancoragem de unidades FPSO na costa oeste da África, contando com uma base de dados de 58 eventos de *squall* durante um período de 5 anos e 8 meses.

Ademais, Brown *et al.* (2017) apresentaram uma metodologia para estimar valores de resposta de embarcações a *squalls* com base na análise de valores extremos. Este método foi

aplicado a uma embarcação (tipo FLNG - *Floating Liquefied Natural Gas*) e considerou dois cenários de localização: a Costa Oeste da África e o Mar da China Meridional. O banco de dados da Costa Oeste da África consistiu em 20 *squalls* com uma duração média em torno de 1 ano de medição, enquanto o banco de dados do Mar da China Meridional representou aproximadamente 5 anos de medições e consistiu em 215 eventos.

Posteriormente, Naciri e Chitrapu (2019) ao analisarem um histórico de 10 anos de dados de velocidade e direção do vento, amostrados em intervalos de 1 (um) minuto, coletados do Mondo FPSO na Costa da Angola, conseguiram identificar um total de 156 eventos de *squall*.

No que diz respeito à ocorrência de *squalls* sobre o mar da Costa do Japão, Lu, Osaki e Wada (2017) analisaram 18 anos de dados meteoceanográficos provenientes de quatro ilhas japonesas. Os números de ocorrências de *squalls* encontradas foram os seguintes: Ilha Hachijo (645), Ilha Yonaguni (375), Ilha Minami-tori (154) e Ilha Minami-daito (126). Vale destacar que 62 eventos de *squall* ocorridos na Ilha Hachijo foram relacionados a ciclones explosivos.

Para o Golfo do México, Jeans *et al.* (2014) combinaram dados de vento de 24 estações de domínio público, uma série temporal efetiva de 39 anos de dados. Dentro desse conjunto de informações combinadas, foram identificados um total de 219 eventos *squall* com velocidades de pico acima de 22 m/s a 10 metros de altura, usando um método de triagem baseado na definição de *squall* da OMM.

Posteriormente, Jeans, Copper e Yetsko (2016) apresentaram novos critérios de *squall* para o Golfo do México, usando uma abordagem baseada na análise de valores extremos de *squalls*. Os resultados advindos deste estudo evidenciaram que os valores extremos de vento de *squall* no Golfo do México são mais altos do que os valores preliminares relatados em um estudo prévio realizado por Jeans *et al.* (2014). Além disso, a distribuição sazonal dos eventos de *squall* também foi apresentada, mostrando que a maioria dos eventos ocorre durante os meses de verão e outono.

Conforme o estudo realizado por Mariani *et al.* (2017), na região Noroeste da Austrália, são identificados diversos eventos de *squalls*, exemplificando essa constatação, são citados dois casos particulares: o primeiro ocorreu ao largo da Costa de Pilbara, no dia 09 de janeiro de 2013, com velocidade do vento atingindo até 28 m/s; o segundo aconteceu em 12 de fevereiro de 2013, em Onslow, onde foram registradas rajadas de até 32 m/s.

Das *et al.* (2015) discutem a ocorrência de eventos de *squall* na Ásia Meridional, mas especificamente em Bangladesh durante a estação pré-moção (março a maio). O estudo se dedica a uma análise específica, abrangendo quatro casos de *squalls* que ocorreram em maio de

2011 em Bangladesh e regiões adjacentes.

Esses estudos demonstram a ampla distribuição das *squalls* em várias partes do mundo, bem como a necessidade de compreender esses fenômenos meteorológicos.

2.2 Sistemas associados ao desenvolvimento de *squalls*

Por serem fenômenos transientes de mesoescala, as *squalls* rotineiramente estão associadas à condição de tempo severas e frequentemente são acompanhadas por chuva e tempestade. Segundo Lu e Osaki (2015) existem vários sistemas atmosféricos que podem contribuir para a ocorrência de *squalls* no Sudeste do Brasil, por exemplo, os sistemas de baixa pressão de escala sinótica, as frentes frias, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), entre outros. Dentre os fenômenos de mesoescala destacam-se as tempestades convectivas, em especial as Linhas de Instabilidade (LIs), e os *downbursts*.

2.2.1 Tempestades em Mesoescala

De acordo com Weisman e Klemp (1982) as tempestades convectivas em mesoescala são classificadas com base nos seguintes termos: grau de severidade (capacidade de produzir granizo, ventos fortes, tornados, entre outros), tempo de vida, modo de propagação, intensidade da precipitação e outras características relacionadas. Estas podem ser constituídas por células individuais, multicélulas ou supercélulas:

- **Células individuais:** conhecidas por tempestades em cumulonimbus isolados, consistem de uma única corrente de ar ascendente principal. São fenômenos instáveis de escala espaço-temporal pequena, com dimensões horizontais variando de 5 a 10 km e tempo de vida curto, geralmente menor que 1 hora;
- **Multicélulas:** aglomerado de células convectivas simples de vida curta, sendo caracterizadas por várias correntes ascendentes principais (Weisman; Klemp, 1986). Assim sendo, o tempo de vida deste tipo de tempestade dependerá do tempo de vida de cada célula individual, podendo chegar a várias horas. São exemplos mais comuns de tempestades multicelulares: as linhas de instabilidade (LIs) e os Complexos Convectivos de Mesoescala;
- **Supercélulas:** forma especial de uma tempestade severa em seu estágio maduro, consistem de uma corrente de ar ascendente simples, quase estacionária com relação a um sistema de referência centrado na tempestade e com rotação. Podem possuir um

tempo de vida de várias horas (Browning; Ludlam, 1962), são as mais perigosas, maiores, mais intensas e destruidoras dentre os tipos de tempestades convectivas (Chappell, 1986), e normalmente são as que produzem as condições de tempo mais severas, dentre elas, ventos intensos e rajadas, microexplosões, entre outros.

Segundo Santala *et al.* (2014), a escala espacial das tempestades associadas às *squalls* variam, desde células isoladas na ordem de alguns quilômetros até LIs (tempestades multicelulares) com regiões frontais que se estendem por centenas de quilômetros. Evidências de variações no tipo de tempestade também foram vistas por Berkes *et al.* (2012).

Rodrigues *et al.* (2022) analisaram um caso de tempestade com ventos fortes (máximo de 31,4 kt) e rajadas ocorrido no dia 30 de janeiro de 2020, e que resultou em um incidente envolvendo o navio plataforma P-70 do Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) na Baía de Guanabara. Seus resultados mostraram que a tempestade se formou em um ambiente de intenso forçamento termodinâmico na superfície e suporte dinâmico em níveis médios e altos, favorecido pela instabilidade pré-frontal, juntamente com uma grande oferta de umidade em baixos níveis e a atuação da ZCAS, que favoreceu a propagação e desenvolvimento do sistema convectivo e potencializou as chuvas com rajadas de vento sobre a Região Metropolitana do Rio de Janeiro e Oceano adjacente. É relevante enfatizar que existe uma considerável possibilidade de que esse episódio tenha desencadeado *squalls*.

2.2.1.1 Linhas de Instabilidade

As Linhas de Instabilidade (LIs) são um tipo de tempestade em multicélulas em forma de linha que possui um importante papel no regime de precipitação das regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Vianello e Alves, 2000). De acordo com Menezes, Paiva e Silva (2000), o deslocamento das LIs no Brasil e em especial na região de estudo é predominantemente de oeste para leste, em geral à frente de uma onda frontal.

Sales e Pereira Filho (2005) *apud* Lu e Osaki (2015) estudaram uma linha de instabilidade pré-frontal que atingiu a Região Metropolitana de São Paulo, trazendo chuvas intensas e fortes rajadas de vento. Posteriormente esse sistema convectivo se deslocou para leste em direção ao mar próximo a São Paulo, provocando uma mudança brusca na condição de vento. Uma alta probabilidade de que também tenha causado *squall* durante sua passagem pelo oceano.

2.2.2 *Downbursts*

Fujita (1985) define os *Downbursts* como uma forte coluna densa de ar frio, que descendem em direção ao solo, e ao atingir a superfície induzem uma forte explosão de ventos divergentes. Em outras palavras, *Downbursts* são fenômenos meteorológicos, de caráter extremamente local, formados a partir de tempestades convectivas severas e que desencadeiam intensas rajadas de vento. Esses eventos podem ser estudados de acordo com sua extensão horizontal, intensidade e duração, sendo subdivididos em (Fujita, 1985 *apud* Franco, 2017):

- **Macrobusts ou macroexplosão:** grandes *Downbursts* que se estendem por áreas maiores que 4 km de diâmetro, são capazes de atingir velocidades máximas de até 60 m/s e persistem por um período entre 5 e 20 minutos;
- **Microbursts ou microexplosão:** pequenos *Downbursts* com extensão horizontal inferior a 4 km de diâmetro, ventos máximos de até 75 m/s e duração entre 2 a 5 minutos.

Berkes *et al.* (2012) conduziram uma análise detalhada das *squalls* na Bacia do Congo e no Atlântico Equatorial adjacente, com ênfase na dinâmica e climatologia da região. Para tal, foram utilizadas observações meteorológicas de alta resolução temporal de três plataformas de petróleo na Costa de Angola. Dentre os resultados obtidos, destaca-se que as microexplosões de mesoescala são responsáveis por pelo menos 1/3 das *squalls* fortes, enquanto aquelas desencadeadas por LIs ocorrem com menor frequência.

CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A região de estudo compreende as duas principais bacias sedimentares da plataforma continental brasileira: a Bacia de Campos e a Bacia de Santos (Figura 3.1).

A Bacia de Campos, é a principal área sedimentar já explorada na costa brasileira, e se estende das imediações da cidade de Vitória, no Espírito Santo, até o Alto de Cabo Frio, no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, abrangendo uma área de aproximadamente 100 mil km² entre os paralelos 21°S e 23°S. Está limitada ao norte com a Bacia do Espírito Santo e ao sul pela Bacia de Santos (Rangel *et al.*, 1994).

Já a Bacia de Santos, é a maior bacia sedimentar *offshore* a ser explorada no Pré-sal brasileiro e a principal bacia receptora dos investimentos em exploração e produção por parte da PETROBRAS (Souza; Sgarbi, 2019). Ela ocupa cerca de 350.000 km² entre os paralelos 23°S e 28°S, compreende uma área que vai desde Florianópolis até Cabo Frio, ou seja, é uma bacia adjacente a quatro estados brasileiros: Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro, limitando-se ao norte com a Bacia de Campos pelo Alto de Cabo Frio e ao Sul com a Bacia de Pelotas pela Plataforma de Florianópolis (Moreira *et al.*, 2007).

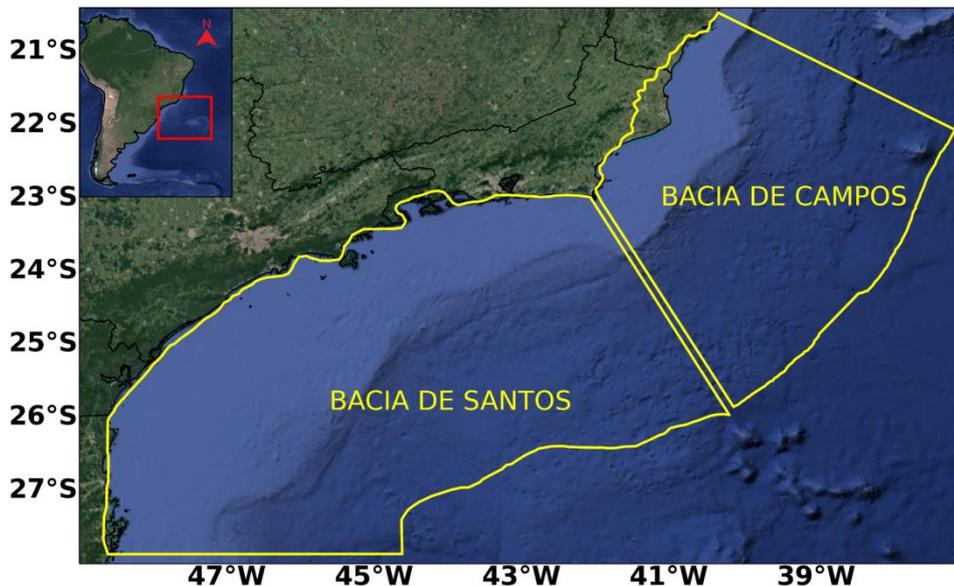


Figura 3.1 - Localização das Bacias de Campos e de Santos. A linha amarela marca a delimitação das Bacias.

3.2 Dados

3.2.1 Dados observados

Para identificação, análise e classificação dos eventos de *squall* foram utilizados dados de velocidade e direção do vento medidos por 2 (dois) anemômetros da PETROBRAS localizados nas plataformas P-57 (21,23927°S e 040,04759°W) e P-48 (22,66289°S e 040,23951°W) na Bacia de Campos. Os dados foram coletados para o período de 27/06/2019 até 15/09/2021 para a plataforma P-57 e de 28/09/2018 até 15/09/2021 para a plataforma P-48, com um lacuna de 1 (um) mês de dados entre 20/11/2018 e 20/12/2018.

Ademais, foram utilizados dados de intensidade e direção do vento do Navio-sonda NS-44 (*Laguna star*) (24,78779°S e 042,70811°W), localizado na Bacia de Santos, para o dia 09/04/2022, durante o intervalo das 20:00 às 22:00 UTC. A distribuição espacial dos anemômetros pode ser vista na Figura 3.2.

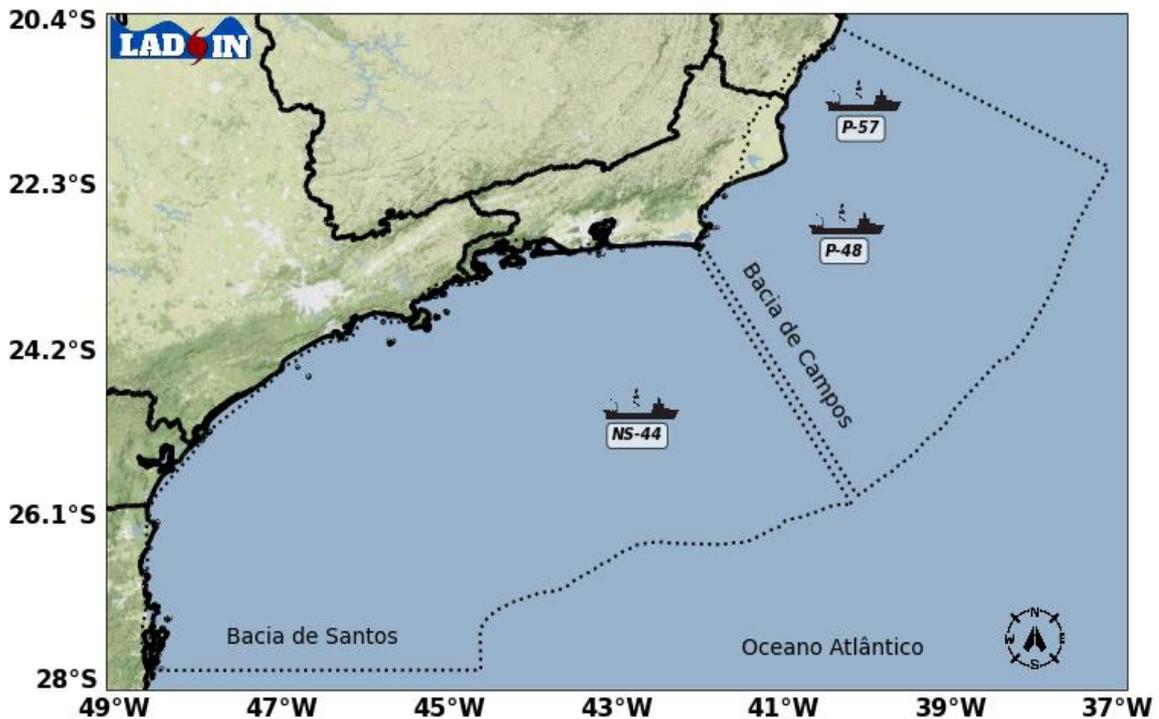


Figura 3.2 - Localização dos anemômetros das Plataformas P-57, P-48 e Navio Sonda NS-44 na região das Bacias de Campos e de Santos.

Os conjuntos de dados descritos acima são classificados como reservados pela PETROBRAS, e o acesso aos mesmos é restrito. Para viabilizar a pesquisa de candidatos a

squall, foi desenvolvido um algoritmo em *Python* para identificar esses eventos. Com o intuito de abranger o maior número de casos, adotou-se critérios que são inferiores ao estabelecido pela OMM (WMO, 1962), com limiares de 7 m/s para a variação da velocidade do vento e valores de pico superiores a 9 m/s.

Os técnicos da PETROBRAS utilizaram o algoritmo nas séries temporais completas das plataformas P-57 e P-48 para identificar casos potenciais de *squalls*. Como o processo foi automatizado, alguns eventos pré-selecionados, apesar de obedecerem aos critérios estabelecidos, não apresentavam semelhança com os 6 tipos de *squall* da literatura (ver seção 2.1.3.1 - Quanto a configuração da série temporal). Além da semelhança com os tipos de *squall* da literatura, outra preocupação foi o crescimento brusco da velocidade do vento, que impacta as operações no mar, assim, casos que não apresentavam essa característica foram descartados. Ademais, os casos selecionados pelo algoritmo em Python foram analisados individualmente por meio de inspeção visual, resultando na validação de 7 casos de *squalls* para a P-48 e 9 casos para a P-57, totalizando de 16 eventos de *squalls* para ambas as plataformas.

Para o Navio Sonda NS-44, o método adotado não consistiu em varrer uma série de dados em busca de eventos de *squalls*. Em vez disso, optou-se por uma análise direta e específica de 1 (um) caso conhecido de *squall* de elevado impacto socio-econômico.

A Tabela 3.1 fornece as séries temporais de intensidade e direção do vento para os 17 casos de *squall* selecionados para este estudo, assim como a altura dos anemômetros das plataformas P-57 e P-48 e do Navio Sonda NS-44.

Tabela 3.1 - Casos de *squall* e as séries temporais de intensidade e direção do vento para os anemômetros localizados nas plataformas P-57, P-48 e NS-44. O formato da data segue a ordem dia, mês e ano, enquanto o da hora é apresentado em horas, minutos e segundos. Os horários estão expressos em UTC (*Coordinated Universal Time*).

Nº	Local	Altura do anemômetro (m)	início	fim
1	P-48	57	19/10/2018 23:00:00	22/10/2018 23:00:00
2	P-48	57	03/03/2019 23:00:00	06/03/2019 23:00:00
3	P-57	66	03/07/2019 23:00:00	06/07/2019 23:00:00
4	P-48	57	19/08/2019 23:00:00	22/08/2019 23:00:00
5	P-48	57	07/10/2019 23:00:00	10/10/2019 23:00:00
6	P-57	66	09/11/2019 23:00:00	12/11/2019 23:00:00
7	P-48	57	09/02/2020 23:00:00	12/02/2020 23:00:00
8	P-57	66	21/02/2020 23:00:00	24/02/2020 23:00:00
9	P-57	66	28/02/2020 23:00:00	02/03/2020 23:00:00
10	P-48	57	22/06/2020 23:00:00	25/06/2020 23:00:00
11	P-57	66	14/01/2021 23:00:00	17/01/2021 23:00:00
12	P-57	66	05/03/2021 23:00:00	08/03/2021 23:00:00
13	P-57	66	29/03/2021 23:00:00	01/04/2021 23:00:00
14	P-48	57	16/04/2021 23:00:00	19/04/2021 23:00:00
15	P-57	66	26/04/2021 23:00:00	29/04/2021 23:00:00
16	P-57	66	07/06/2021 23:00:00	10/06/2021 23:00:00
17	NS-44	93,25	09/04/2022 20:00:00	09/04/2022 22:00:00

3.2.2 TSM MUR

Para a análise sinótica do estudo de caso de *squall*, foram utilizados dados de temperatura da superfície do mar (TSM) obtidos do *Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature* (TSM MUR) do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) para o dia 09 de abril de 2022. Este produto é gerado diariamente pelo GHRSSST (*Group for High Resolution Sea Surface Temperature*), sendo o resultado da fusão de vários dados de temperatura de diferentes sensores e satélites, nas faixas do infravermelho (AVHRR - *Advanced Very High Resolution Radiometer* e MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e micro-ondas (WindSat - *microwave imaging radiometer* e AMSR-E - *Advanced Microwave Scanning Radiometer*), completados com medições *in situ* adquiridas por boias e navios (Chin; Vazquez-Cuervo; Armstrong, 2017).

A TSM MUR possui uma resolução espacial de $0,01^\circ$ (~ 1 km) e está entre os conjuntos de dados de análise de TSM de maior resolução atualmente disponíveis. Mais informações sobre a TSM MUR podem ser encontradas em: http://podaac.jpl.nasa.gov/Multi-scale_Ultra-high_Resolution_MUR-SST.

3.2.3 TSM NOAA

Ademais para o cálculo de anomalia de TSM do dia 09 de abril de 2022 (estudo de caso), foram utilizados dados de análise de TSM de interpolação ótima diária (OISST - *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*) da *National Oceanic and Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Information* (NOAA/NCEI) de $1/4$ de grau e a análise combinada de alta Resolução da Temperatura média diária da superfície do mar a longo prazo usando dados de satélite do sensor AVHRR com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (Huang *et al.*, 2021).

3.2.4 Reanálise ERA5

Devido à baixa quantidade de dados meteorológicos na área oceânica, o uso de reanálises torna-se uma importante estratégia para compensar a falha ou ausência de dados na região de interesse.

Assim sendo, as informações atmosféricas utilizadas neste trabalho são oriundas da 5ª geração de reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), denominada ERA5, com resolução horizontal de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (~ 28 km), obtida a cada 1 hora para o período de 08 a 10 de abril de 2022 (Hersbach *et al.*, 2020).

As variáveis utilizadas da reanálise ERA-5 foram: Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), componentes zonal (u) e meridional (v) do vento a 10 metros de altura, geopotencial, componentes u e v do vento, temperatura do ar, umidade relativa e umidade específica em 37 níveis de pressão (1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975 e 1000 hPa).

3.3 Métodos

A metodologia empregada neste estudo envolveu a realização de cinco etapas, as quais estão resumidas no Fluxograma da Figura 3.3:

1. Seleção e aquisição dos casos de *squalls*: Inicialmente, a PETROBRAS disponibilizou uma base de dados privada contendo 17 casos de *squalls* (seção 3.2.1 - Dados observados);
2. Preparação dos dados para análise: Em seguida, foi realizado um pré-processamento das séries de dados adquiridas. Essa etapa incluiu a reamostragem dos dados observados para intervalos de 1 (um) minuto, a correção da intensidade do vento para a altura padrão de 10 metros acima do nível médio do mar e a conversão da direção para o norte verdadeiro (definição meteorológica), conforme explicado na seção 3.3.1 - Pré-processamento dos dados observados;
3. Caracterização dos casos de *squalls*: Posteriormente as *squalls* foram caracterizadas no que diz respeito a sua intensidade (velocidade inicial e aumento da velocidade do vento), direção (mudanças de direção do vento), tempo de duração, tempo de subida (tempo a partir do qual a velocidade do vento começa a aumentar até a velocidade de pico), entre outras características relevantes. Os detalhes deste procedimento encontram-se na seção 3.3.2 - Caracterização das *Squalls*;
4. Classificação das *squalls*: A quarta etapa consistiu na categorização dos eventos de *squalls* de acordo com a classificação proposta por Lu, Osaki e Wada (2017), levando em consideração o formato das séries temporais de intensidade do vento (ver seção 2.1.3.1 - Quanto a configuração da série temporal);
5. Estudo de Caso: Por fim, um caso de *squall* de alto impacto socioeconômico foi selecionado para ser estudado com maiores detalhes (descrito na seção 3.3.3 - Estudo de caso).

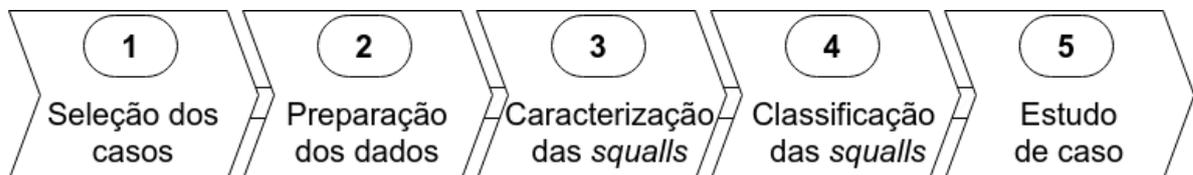


Figura 3.3 - Fluxograma com as principais etapas da metodologia da pesquisa.

3.3.1 Pré-processamento dos dados observados

As medições dos dados observados foram feitas a cada segundo, o que ocasiona séries temporais muito grandes. Para otimizar o trabalho de pesquisa, essas séries foram promediadas de minuto a minuto, diminuindo assim em 60 vezes o tamanho das séries originais. As médias de 1 (um) minuto foram escolhidas por serem o valor estabelecido pela OMM como duração mínima do pico da *squall*.

Vale mencionar que o critério da OMM para identificação de *squall* (WMO, 1962), não especifica em qual elevação a velocidade do vento é reduzida. No entanto, geralmente a OMM se refere ao vento sustentado a 10 metros acima do nível do mar (Naciri; Chitrapu, 2019). Tendo em vista esta observação, os dados de intensidade do vento descritos na Tabela 3.1 foram convertidos para 10 metros utilizando equação (DNV, 2007) a seguir, considerando uma classe de estabilidade atmosférica neutra:

$$V_Z = V_{10} \left(1 + 0,137 \ln \frac{Z}{Z_r}\right) \quad (3.1)$$

onde, V_Z é a intensidade do vento medida a uma altura Z , V_{10} é intensidade do vento a 10 metros, Z é altura do anemômetro acima do nível do mar expressa em metros, Z_r é a altura de referência, ou seja, 10 metros.

Ademais, a direção do vento medida foi corrigida para o norte verdadeiro, uma vez que os anemômetros localizados nas plataformas P-57 e P-48 e no navio-sonda NS-44, medem a direção do vento em relação ao eixo longitudinal do navio (conforme ilustrado na Figura 3.4). Para efetuar essa correção aplicou-se as Equações 3.2, 3.3 e 3.4:

$$Dir = Dir_V + Aproamento \quad (3.2)$$

$$Dir_{cor} = Dir - 360, \text{ se } Dir > 360 \quad (3.3)$$

$$Dir_{cor} = Dir, \text{ se } Dir \leq 360 \quad (3.4)$$

sendo que Dir_V é direção do vento sem correção, o *Aproamento* é ângulo entre o norte verdadeiro e o eixo longitudinal do navio, Dir_{cor} é a direção real em relação ao norte verdadeiro, ou seja, a direção corrigida.

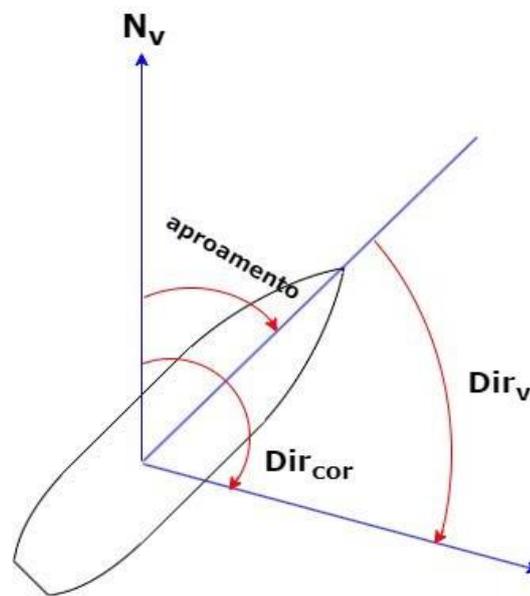


Figura 3.4 - Esquema exemplificando o método utilizado para corrigir a direção do vento para o Norte Verdadeiro (N_v).

3.3.2 Caracterização das *Squalls*

Seguindo uma metodologia análoga utilizada por Legerstee *et al.* (2006), Duggal *et al.* (2011) e Cao *et al.* (2018), as séries temporais de velocidade do vento de 1 (um) minuto foram caracterizadas objetivamente a partir de doze parâmetros. Esses parâmetros estão representados pela Figura 3.5 e são definidos a seguir:

- v_0 : representa a velocidade inicial da *squall*;
- t_0 : tempo inicial, é o ponto de partida da *squall*, ou seja, é momento que ocorre a velocidade inicial (v_0);
- v_p : velocidade de pico, é o valor máximo de velocidade do vento observado ao longo de um intervalo de tempo que se estende desde o vento inicial (v_0) até 30 minutos após esse ponto de partida;
- t_p : tempo de pico, ou seja, é o momento que a *squall* atinge sua velocidade de pico (v_p);
- v_{max} : velocidade máxima que a *squall* atinge, é o valor máximo da velocidade do vento observada ao longo de todo o tempo de vida da *squall*;
- t_{max} : tempo de máxima velocidade, ou seja, é o momento que a *squall* alcança sua velocidade máxima (v_{max});

- t_f : tempo final, é o instante do fim da *squall*. Definido como o primeiro mínimo após a *squall* atingir sua velocidade máxima (v_{max}). No entanto, se nas proximidades desse primeiro mínimo ainda existirem valores acima de 11 m/s, seleciona-se o ponto mínimo subsequente até que o valor de referência seja respeitado;
- t_r : tempo de subida ou duração do aumento da velocidade do vento, ou seja, o tempo que leva desde o tempo inicial (t_0) até o tempo de pico (t_p).
- Δv : variação da velocidade, é a diferença entre a velocidade de pico (v_p) e velocidade inicial (v_0), descrita pela Equação 3.5:

$$\Delta v = v_p - v_0 \quad (3.5)$$

- t_d : tempo de descida ou meia-vida de decaimento, definido como a metade do tempo decorrido entre o pico da *squall* e o seu valor mínimo (v_0). Em outras palavras, é o tempo que leva desde o pico da *squall* (t_p) até o instante que a velocidade atinge o valor de $(\frac{\Delta v}{2} + v_0)$;
- a : taxa de variação da velocidade do vento, graficamente corresponde a inclinação da reta que passa pelos pontos v_0 e v_p (Figura 3.5) e pode ser calculada através da Equação 3.6:

$$a = \frac{\Delta v}{t_r} \quad (3.6)$$

- t : duração da *squall*, corresponde o tempo decorrido desde o início (t_0) até o fim (t_f) da *squall*.

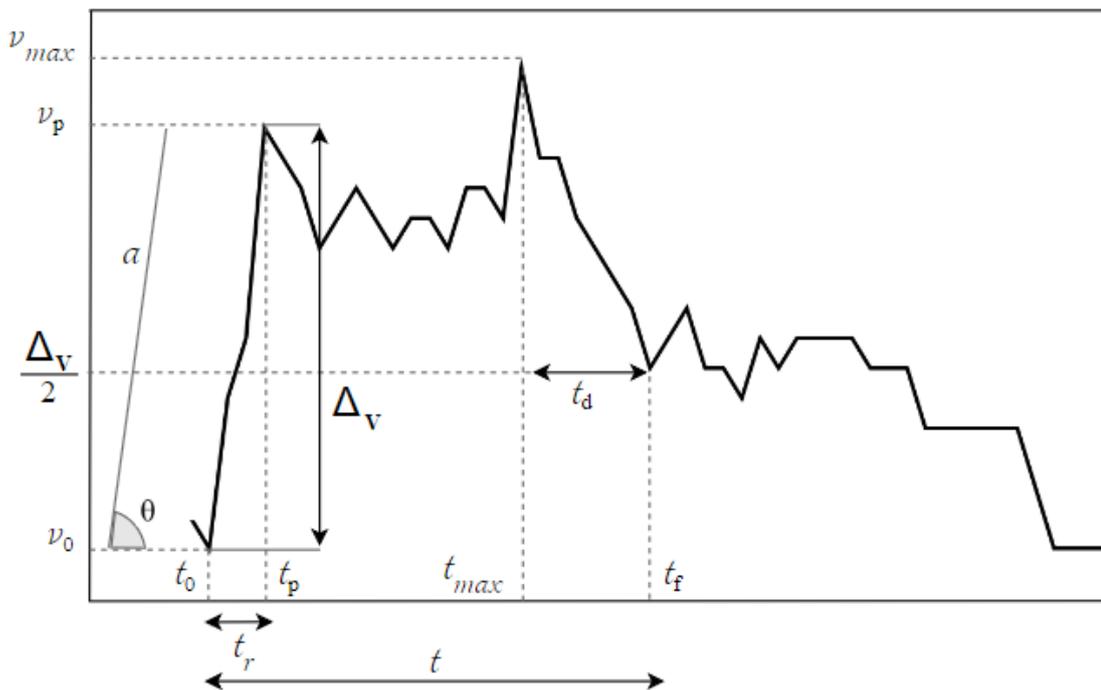


Figura 3.5 - Representação dos parâmetros adotados na caracterização de *squalls*.

Adicionalmente, para a caracterização em questão, foram adotados os critérios principais conforme apresentado na Tabela 2.1 (seção 2.1.2 - Características gerais). Para definir o início (v_0 e t_0) e o pico (v_p) das *squalls*, foi estabelecido o valor de no máximo 30 minutos para o tempo de subida e uma taxa de variação da velocidade do vento de pelo menos 8 m/s em 20 minutos, que equivale a $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{min}$.

A Figura 3.6 ilustra o método para determinação do ponto de partida e da velocidade de pico das *squalls* a partir de uma série temporal simbólica. Inicialmente, priorizou-se a maior variação da velocidade do vento, no caso da Figura 3.6 a distância A-E. Após, foram analisados os valores de tempo de subida e taxa de variação do vento. Se esses valores atendessem aos critérios estabelecidos ($a \geq 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{min}$ e $t_p \leq 30 \text{ min}$), os pontos A e E eram designados como o início e o pico da *squall*, respectivamente. Caso contrário, selecionava-se outros pontos como candidatos, até que os mesmos atendessem às exigências. Esse processo foi aplicado a todas as séries temporais de *squalls*.

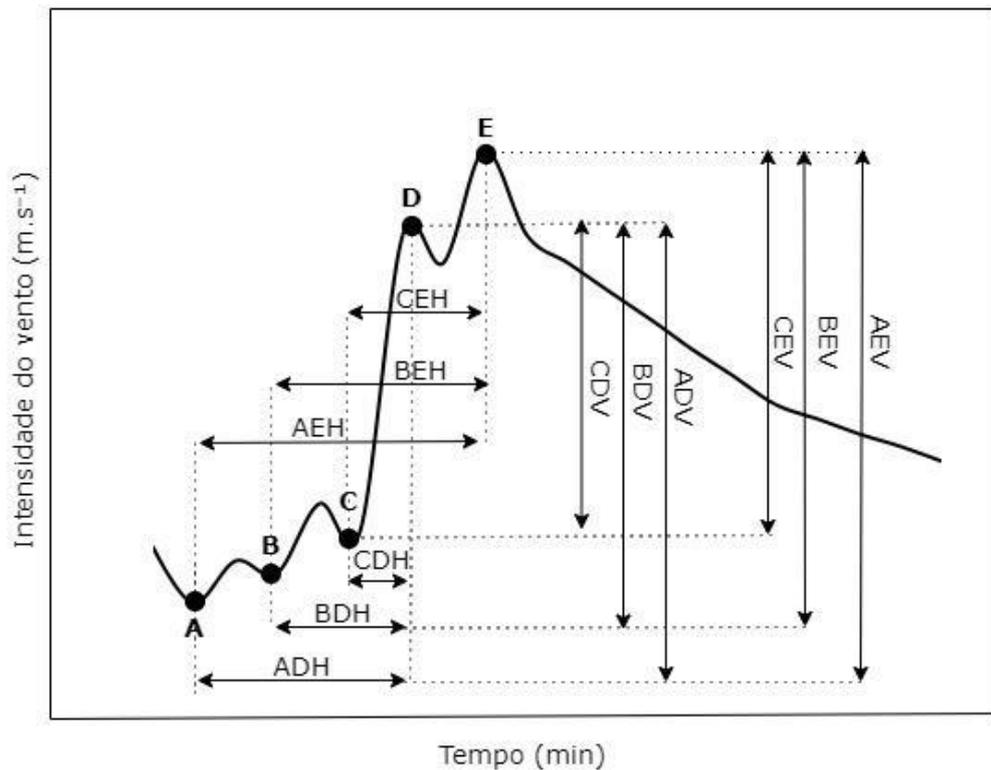


Figura 3.6 - Exemplificação do método para definição do início e da velocidade de pico da *squall*. Nesta representação gráfica, os pontos A, B e C correspondem às opções de início da *squall*, enquanto os pontos D e E são os possíveis picos. As distâncias horizontais, ou seja, as distâncias no tempo (tempo de subida, em minutos), são referidas como ADH, BDH, CDH, AEH, BEH e CEH, e as distâncias verticais (variação da velocidade do vento, em m.s⁻¹) são indicados por ADV, BDV, CDV, AEV, BEV e CEV.

Por fim, a direção do vento foi analisada para oito direções principais da rosa dos ventos: Norte: (N), Nordeste (NE), Leste (E), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SW), Oeste (W) e Noroeste (NW), resultando em uma distribuição com intervalos de 45 graus para cada uma. A direção da *squall* foi definida como a direção do vento no momento em que atingiu sua velocidade máxima, e também foram avaliadas quaisquer variações na direção antes e durante as *squalls*. Os parâmetros de direção do vento analisados incluem:

- Δdir_{antes} : refere-se à variação da direção no período de 30 minutos que antecede o início da *squall*. É calculada como a diferença entre a direção 30 minutos antes do início da *squall* (dir_{30}) e a direção no instante imediatamente anterior ao início da *squall* (dir_{i-1}), sendo definida como:

$$\Delta dir_{antes} = dir_{30} - dir_{i-1} \quad (3.7)$$

- $\Delta dir_{durante}$: representa a variação da direção durante a *squall*, desde o seu início até o momento em que a *squall* atinge sua intensidade máxima. Isso é determinado pela diferença entre a direção no pico (dir_{tmax}) e a direção no início da *squall* (dir_i), descrita pela Equação 3.8:

$$\Delta dir_{antes} = dir_{tmax} - dir_i \quad (3.8)$$

- $max\Delta dir$: taxa máxima de variação da direção, ou seja, é a maior mudança da direção do vento em 1 (um) minuto, e é calculada a partir da Equação 3.9:

$$max\Delta dir = (max|dir_{k+1} - dir_k|)/t \quad (3.9)$$

onde, o índice k varia de 1 até $n-1$, n é o número total de pontos da série de dados, dir_k representa a direção no ponto k , dir_{k+1} é a direção no ponto $k+1$, max denota o valor máximo dentre todas as diferenças absolutas da série e t é o tempo durante o qual a variação ocorreu, ou seja, 1 (um) minuto. Sendo que o valor absoluto ($| |$) é usado para garantir que a diferença seja sempre positiva.

Essa formulação foi aplicada para encontrar a taxa máxima de variação da direção do vento antes ($max\Delta dir_{antes}$) e durante ($max\Delta dir_{durante}$) os eventos de *squall*. Além disso, foi considerada a menor diferença angular entre dir_k e dir_{k+1} , uma vez que as direções são medidas em um círculo de 360 graus.

- Δdir_{total} : variação total da direção do vento. Para uma sequência contínua de variações na direção do vento (mudanças complementares), corresponde a soma entre a variação da direção antes e durante o evento de *squall* ($\Delta dir_{antes} + \Delta dir_{durante}$). Caso contrário (mudanças não-complementares), é definida como a maior variação entre as duas situações (Δdir_{antes} ou $\Delta dir_{durante}$).

3.3.3 Estudo de caso

O episódio de *squall* selecionado para um estudo de caso ocorreu no dia 09 de abril de 2022, próximo às 21Z. Durante esse evento, foi registrado um aumento da velocidade do vento em um curto período de tempo, que causou o deslocamento do navio sonda NS-44 na Baía de Santos.

Além dos dados observados - para análise, identificação, classificação e rastreamento do sistema meteorológico associado ao desenvolvimento da *squall* em questão - foram

utilizadas as cartas sinóticas da Marinha do Brasil (nos horários padrões 00Z e 12Z) e imagens da série 16 do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-16) no canal do infravermelho (10.35 μ m) com resolução temporal de 10 minutos.

Ademais, para identificar a posição e a nebulosidade associada ao sistema atmosférico que pode ter contribuído para a ocorrência da *squall*, as informações oriundas da reanálise ERA5 foram visualizadas através da linguagem de programação Python versão 3.9. Por meio de uma rotina foram elaborados campos de vorticidade relativa em 1000 hPa (10^{-5}s^{-1}), Vento a 10 metros (kt), PNMM (hPa), magnitude do vento em 200 hPa e 850 hPa (kt) e umidade específica em 850 hPa (g/kg). Além disso, calculou-se a componente meridional do vento ageostrófico (vag) e a divergência para determinar a posição do Jato de Altos Níveis em relação ao sistema em superfície.

Sabendo-se que a formação, o desenvolvimento e a manutenção dos fenômenos atmosféricos em diferentes escalas espaciais dependem das condições da superfície, haja vista a constante interação entre atmosfera e superfície, a TSM desempenha um papel relevante na contribuição de análises sinóticas, podendo influenciar direta ou indiretamente a região de domínio de uma determinada tempestade. Tendo isso em mente, foram plotados e analisados campos com a TSM MUR da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e as anomalias diárias de TSM calculadas com base nos dados de análise de TSM da NOAA. Para tal, a média climatológica diária (período base 1971-2000) foi subtraída do valor de TSM diária observada, descrita pela Equação 3.10:

$$X' = X - \bar{X} \quad (3.10)$$

onde, X' é a anomalia de TSM diária, X é a TSM do dia e \bar{X} é a TSM média climatológica diária.

Posteriormente, para entender as características termodinâmicas antecessoras a ocorrência do evento de *squall* foram utilizadas as sondagens do Aeroporto Internacional do Galeão (SBGL), obtidos a partir do *software* RAOB (*RAwinsonde OBServation*) do Alerta Rio e plotados perfis verticais de temperatura e umidade (Diagramas Skew-T Log-P) a partir de informações da reanálise ERA5, através da linguagem Python. Além disso, para complementar esta análise, foram calculados e plotados campos espaciais de alguns índices atmosféricos (descritos na seção 3.4) e perfis longitudinais de umidade específica e umidade relativa a partir de informações da reanálise ERA5.

3.4 Índices atmosféricos

Os índices atmosféricos calculados para este trabalho foram subdivididos na categoria de índice termodinâmico e cinemático. Os termodinâmicos são: CAPE (*Convective Available Potential Energy*), índice *Total Totals* (TT), índice K (K), índice convectivo (KO) e DCAPE (*downdraft CAPE*). Para a categoria de índice cinemático, foi utilizado o cisalhamento vertical do vento na baixa troposfera (SHEAR).

As definições dos índices atmosféricos e seus respectivos valores limítrofes são dados a seguir.

3.4.1 CAPE

O CAPE é a quantidade de energia potencial que uma parcela pode obter das condições do ambiente, sendo um dos parâmetros mais utilizados em previsão convectiva. Em um diagrama Skew-T Log-P é a área positiva situada entre o Nível de Convecção Espontânea (NCE) e o Nível de Equilíbrio (NEL), e por isso seu cálculo é baseado na integral da flutuabilidade da nuvem desde o NCE até o NEL. Em outras palavras, CAPE é a energia termodinâmica que pode ser potencialmente usada para a aceleração vertical de uma parcela de ar em convecção assim que ela atinge o NCE.

A determinação da CAPE será feita usando a seguinte equação (Bluestein, 1993):

$$CAPE = g \int_{NCE}^{NEL} \frac{\theta_v(z) - \bar{\theta}_v(z)}{\bar{\theta}_v(z)} dz \quad [Jkg^{-1}] \quad (3.11)$$

onde, g é aceleração da gravidade, θ_v e $\bar{\theta}_v$ são as temperaturas potenciais virtuais de uma parcela de ar e do ambiente, respectivamente. A unidade de CAPE no Sistema Internacional – SI é $J.kg^{-1}$.

Na Tabela 3.2 constam os valores dos limiares de CAPE, onde quanto maior o seu valor, maior será a quantidade de energia disponível para alimentar a parcela. Entretanto, um valor alto suficiente não implica que as tempestades acontecerão, por exemplo, a existência de uma camada de ar com baixo NCE e alto NEL proporcionam um alto valor de CAPE, todavia a situação termodinâmica existente não precisamente indica uma condição favorável a intensos movimentos verticais ascendentes, haja vista que mesmo um perfil de temperatura próximo ao da razão adiabática úmida pode levar a um alto valor de CAPE. Por esta razão, analisar somente o valor da CAPE não é recomendado para se identificar condições termodinâmicas favoráveis à convecção severa. Vale lembrar que, como qualquer índice, a CAPE é uma condição necessária, porém não suficiente, para ocorrência de tempestades. Desta forma um valor

significativamente grande de CAPE não significa uma grande “probabilidade”, ou “grande chance” de uma tempestade acontecer. Mas, sim, no caso de uma tempestade acontecer sob aquela condição de CAPE alta, ela será vigorosa, produzindo correntes ascendentes intensas, entre outros eventos severos. Logo, o termo correto é “potencialidade”.

Tabela 3.2 - Valores de CAPE e seu potencial para tempestades severas. Fonte: Nascimento, 2005.

CAPE (J.kg ⁻¹)	Potencial para Tempestades Severas
1000 < CAPE ≤ 2500	Alto
2500 < CAPE ≤ 4000	Instabilidade Acentuada
CAPE > 4000	Instabilidade Extrema

3.4.2 Índice *Total Totals*

O índice *Total Totals* (TT) é usado para avaliar a força das tempestades e fornece indicações sobre o potencial para sua ocorrência, a partir da *lapse rate* (taxa de queda da temperatura ambiental com a altura) entre níveis baixos e médios e a umidade do ar ambiente em 850 hPa.

A equação para calcular o valor do parâmetro TT é (Miller, 1972):

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500} \quad [^{\circ}C] \quad (3.12)$$

sendo, T_{850} a temperatura ambiente em 850 hPa, T_{500} a temperatura em 500 hPa e Td_{850} a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa, com unidade de medida em graus Celsius.

De uma forma geral, valores de TT a partir de 40°C indicam situações favoráveis a tempestades, e acima de 50°C estão associados à convecção intensa, como pode ser visto na Tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3 - Valores do Índice *Total Totals* e seu potencial para tempestades. Fonte: Adaptado de Nascimento, 2005.

Índice <i>Total Totals</i> (TT)	Potencial para Tempestades
40 ≤ TT ≤ 50	Situações favoráveis a tempestades
TT > 50	Tempestades severas

3.4.3 Índice K

O Índice K (K) é uma medida do potencial de tempestades, baseado na taxa vertical de variação de temperatura, no conteúdo de umidade na baixa troposfera e na extensão vertical da camada úmida. A equação para o cálculo do índice K é dada por (George, 1960):

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad [^{\circ}C] \quad (3.13)$$

onde, T e Td são, respectivamente, a temperatura ambiente e a temperatura do ponto de orvalho (em graus Celsius) para os níveis de pressão indicados em subscrito.

Desta forma, o índice K leva em conta o *lapse rate* entre níveis baixos e médios (dois primeiros termos do lado direito da Equação 3.13), a umidade em 850 hPa (terceiro termo), e a depressão do ponto de orvalho em 700 hPa (último termo).

Quanto maior for o valor do último termo da Equação 3.13, mais seca a atmosfera estará no nível de 700 hPa, com potencial para evaporação de gotas e hidrometeoros, auxiliando as correntes descendentes, e quando menor for este termo a atmosfera estará mais úmida no nível de 700 hPa.

Na Tabela 3.4 têm-se os critérios de instabilidade atmosférica, quanto mais positivo for o valor de K, maior será o potencial para as tempestades severas. De acordo com Henry (1987), valores de K acima de 30°C são considerados altos (alto potencial para ocorrência de tempestades), e acima de 40°C são extremamente altos (potencial extremo para tempestades).

Tabela 3.4 - Potencial para tempestades em função dos valores do índice K. Fonte: Hallak e Pereira Filho, 2012.

Índice K (K)	Potencial para Tempestades (PT)
$K < 15$	PT = 0%
$15 \leq K \leq 20$	PT < 20%
$21 \leq K \leq 25$	$20\% \leq PT \leq 40\%$
$26 \leq K \leq 30$	$40\% \leq PT \leq 60\%$
$31 \leq K \leq 35$	$60\% \leq PT \leq 80\%$
$36 \leq K \leq 40$	$80\% \leq PT \leq 90\%$
$K > 40$	> 90%

Contudo, o uso do índice K demanda cuidado, pois se não há umidade significativa em 700 hPa, então há uma grande possibilidade da ocorrência de entranhamento de ar seco na

parcela, que a tornará menos flutuante (Bluestein, 1993). Por essa razão, o K sozinho é um pobre indicador de tempestades severas, visto que o ar seco em 700 hPa pode causar instabilidade convectiva e diminuir seu valor. Logo, o ideal é analisá-lo em concomitância com outros índices atmosféricos, como por exemplo, o índice *Total Totals* (TT), pois a presença de camadas úmidas em 850 hPa e 700 hPa implica em um valor significativo de água precipitável.

Sendo assim, a combinação de $K > 24$ com $TT > 45$ indica tendência de desenvolvimento de chuvas torrenciais (alta precipitação acumulada), enquanto que a combinação de $K < 24$ com $TT > 45$ indica tendência de desenvolvimento de tempestades severas (ocorrência concomitante ou isolada de granizo de grandes dimensões, vendavais e altas taxas de precipitação localizadas) [Silva Dias, 2000].

3.4.4 Índice KO

O índice convectivo (do Alemão, *Konvektiv Index* - KO) é baseado no cálculo da temperatura potencial equivalente nos níveis 1000, 850, 700 e 500 hPa e é importante para expressar a instabilidade convectiva entre os baixos e médios níveis da troposfera (Andersson *et al.*, 1989). Além disso, possui uma maior sensibilidade à umidade em baixos níveis do que os índices K e TT (Silva, 2014).

O índice KO pode ser calculado da seguinte forma [Andersson *et al.*, 1989]:

$$KO = 0,5(\theta_{e_{500}} + \theta_{e_{700}} - \theta_{e_{850}} - \theta_{e_{1000}}) \quad [K] \quad (3.14)$$

onde, θ_e é a temperatura potencial equivalente para os níveis de pressão indicados em subscrito.

Quanto menor os valores de KO, mais instável é o ambiente. No entanto, é fundamental a existência de um mecanismo de levantamento da camada de ar, de modo a garantir que a estratificação térmica da coluna atmosférica se torne instável. Sendo que, os valores de KO abaixo de 2 K são considerados altos, valores entre 2 e 6 K são moderados e acima de 6 K apresentam baixo potencial para formação de tempestades (Ribeiro, 2017).

3.4.5 DCAPE

A CAPE da corrente descendente (DCAPE - em inglês, *downdraft CAPE*), é uma outra medida de energia potencial convectiva, e está associada a movimentos descendentes.

A DCAPE é calculada como uma integral vertical da flutuabilidade negativa de uma parcela de ar começando a partir de um determinado nível de pressão para baixo até a superfície. Para o cálculo da DCAPE, assume-se que uma parcela de ar em níveis médios é resfriada isobaricamente até a saturação, causada pela evaporação das gotículas de nuvem e de precipitação e/ou derretimento de flocos de gelo de nuvem em seu interior. Posteriormente esta parcela de ar desce à superfície por um processo pseudoadiabático, mantendo uma taxa de evaporação suficiente para conservar sua temperatura potencial do bulbo úmido.

A determinação da DCAPE pode ser alcançada através da aplicação da Equação 3.15 (Emanuel, 1994), a seguir:

$$DCAPE = g \int_{SUP}^Z \frac{\overline{\theta}_v(z) - \theta_v(z)}{\overline{\theta}_v(z)} dz \quad [Jkg^{-1}] \quad (3.15)$$

onde, as variáveis são as mesmas da Equação (3.11). Contudo há uma mudança no numerador do integrando e nos limites de integração em relação à definição da CAPE. Em (3.15) o limite de integração superior Z é, geralmente, o nível onde se encontra a parcela de ar com a menor temperatura potencial do bulbo úmido (θ_w) na baixa troposfera, comumente avaliada nos primeiros 400 hPa (entre 2 e 7 km) acima da superfície (Gilmore; Wicker, 1998). Já o limite inferior se refere à superfície (ou $Z = 0$).

A Figura 3.7 ilustra o cálculo da DCAPE por um diagrama Skew-T Log P. A integração da área entre a curva pseudoadiabática percorrida por uma parcela de ar e o perfil de temperatura ambiente observado corresponde à DCAPE (área sombreada em azul).

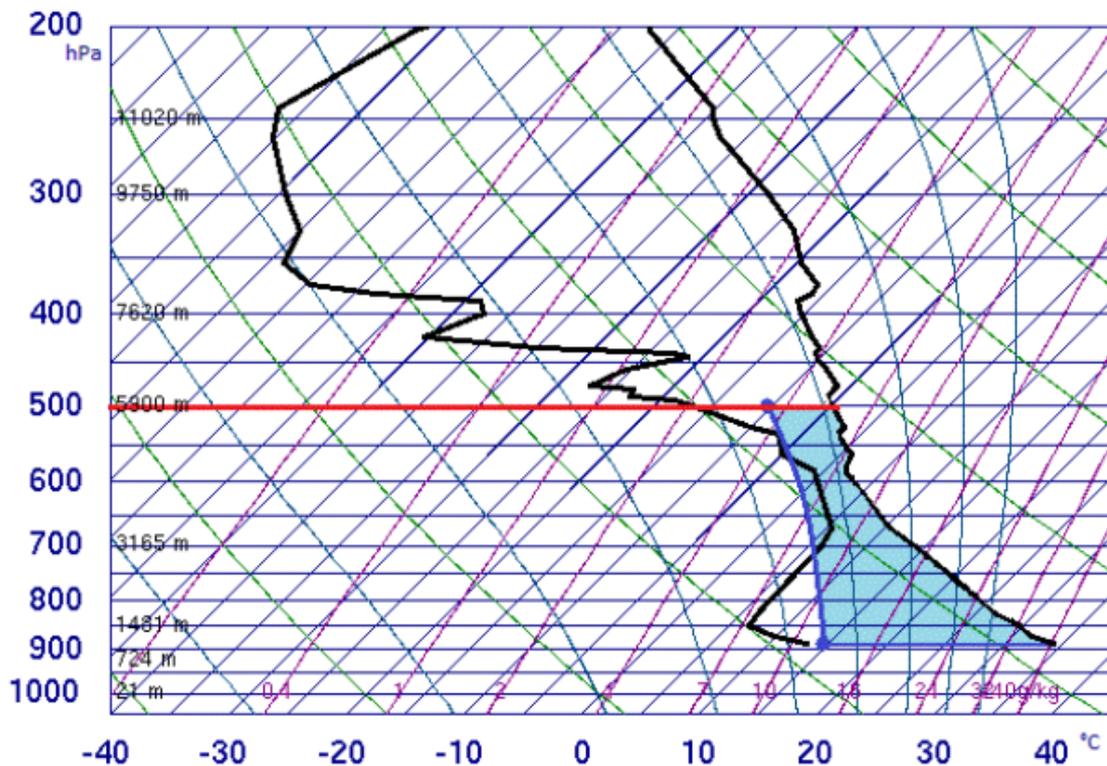


Figura 3.7 - Exemplo de Diagrama termodinâmico Skew-T Log P com os perfis verticais de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, ilustrando o cálculo da DCAPE (correspondente a área sombreada em azul). A linha vermelha marca o limite superior (Z). Imagem baseada na sondagem das 00Z do dia 23/07/2011 para Amarillo, Texas. Fonte: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (Acessado pela última vez em outubro de 2023).

Valores de DCAPE a partir de 1000 J.kg^{-1} são considerados altos, mas em ambientes de intensa forçante sinótica, podem ocorrer tempestades com fortes correntes descendentes mesmo com DCAPE bem abaixo deste valor (Evans; Doswell, 2001 *apud* Nascimento, 2005).

3.4.6 SHEAR

O cisalhamento vertical do vento na baixa troposfera (SHEAR) desempenha um papel importante na formação de correntes ascendentes e correntes descendentes em convecção úmida profunda com influência na determinação do tipo de organização de uma tempestade ou sistema de mesoescala, particularmente em LIs de longa duração.

SHEAR é definido como o valor absoluto da diferença do vento zonal entre os níveis 700 e 925 hPa e a diferença do vento meridional entre os mesmos níveis de pressão (Berkes *et al.*, 2012):

$$SHEAR = \sqrt{(u_{700} - u_{925})^2 + (v_{700} - v_{925})^2} \quad [ms^{-1}] \quad (3.15)$$

onde, u_i e y_i são os componentes zonal e meridional do vento e os subscritos fornecem a pressão (em hPa).

Segundo Berkes *et al.* (2012), para o Atlântico Equatorial Leste, valores de SHEAR acima de 8.8 ms^{-1} são considerados altos; valores entre 5.6 e 8.8 ms^{-1} são moderados e abaixo de 5.6 ms^{-1} são tomados como baixos. Além disso, este índice também mostra alguma destreza na identificação de situações propícias a eventos de *squall*.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise das características das *squalls*

Nesta seção, os resultados da caracterização de eventos de *squalls*, em termos de intensidade e direção do vento, serão analisados e discutidos com base nos critérios mencionados na seção 3.3.2.

4.1.1 Intensidade do vento

Entre os 17 eventos analisados, cinco não atenderam aos critérios estabelecidos pela OMM (WMO, 1962), sendo os mesmos destacados em vermelho na Tabela 4.1. Os eventos foram mantidos, pois tinham o rápido aumento da velocidade (taxa de variação da velocidade maior que $0,4 \text{ m.s}^{-1}/\text{min}$) e outras características associadas à *squall*. É relevante destacar que, entre esses cinco, os casos 10 e 14 teriam cumprido os critérios se fosse aplicada uma abordagem de aproximação. Além disso, Berkes *et al.* (2012) destaca a importância de considerar uma faixa mais ampla de eventos para uma análise mais completa. Visto que as medições são realizadas em alturas superiores a 10 metros da superfície do mar, eventos um pouco mais fracos ainda sim podem ser considerados como *squalls*.

A maioria das *squalls* apresentaram valores de pico coincidentes com suas velocidades máximas, os eventos 9 e 15 destacaram-se, exibindo valores de pico e máximo distintos. Nestes casos, após o registro do pico de velocidade (v_p), a intensidade do vento permaneceu próxima desse valor por algum tempo antes de aumentar novamente.

O caso 14 foi subdividido devido à ocorrência de duas *squalls* consecutivas com magnitude decrescente, denominadas A e B. Além disso, os picos das *squalls* variaram entre 9,5 e 30 m/s, uma média de aproximadamente 14 m/s, sendo que os maiores v_p foram para os casos 17, 13 e 14 B, respectivamente.

A variação da velocidade (ΔV) abrangeu valores entre 7,1 a 16,2 m/s, com uma média de aproximadamente 10 m/s. Quanto à taxa de variação da velocidade (a), esta variou de 0,4 a $2,7 \text{ m.s}^{-1}/\text{min}$, atingindo um valor médio de $0,9 \text{ m.s}^{-1}/\text{min}$.

O evento de maior destaque foi o caso 17, caracterizado por um início com valores de intensidade do vento elevados ($v_0 = 13,9 \text{ m/s}$), uma alta taxa de variação ($a = 2,7 \text{ m.s}^{-1}/\text{min}$),

maiores velocidades máximas (v_{\max}) e uma grande variação da velocidade do vento (ΔV) em comparação aos demais casos.

Tabela 4.1 - Parâmetros relacionados à intensidade do vento das *squalls*: velocidade inicial (v_0), velocidade de pico (v_p), velocidade máxima (v_{\max}) e variação da velocidade (Δv), em m/s, e a taxa de variação da velocidade do vento (a), em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{min}$, considerando os 17 casos identificados e suas respectivas localidades. Os destaques em vermelho são os parâmetros que não atingiram os critérios da OMM (WMO, 1962).

Nº	Local	v_0 [m/s]	v_p [m/s]	v_{\max} [m/s]	Δv [m/s]	a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{min}$]
1	P-48	3,2	11,4	11,4	8,3	0,7
2	P-48	3,8	10,8	10,8	7,1	0,5
3	P-57	0,9	9,9	9,9	9,1	0,9
4	P-48	0,1	14,2	14,2	14,1	0,6
5	P-48	2,2	12,7	12,7	10,5	0,5
6	P-57	5,3	13,4	13,4	8,1	0,4
7	P-48	2,1	12,8	12,8	10,7	2,1
8	P-57	3,1	12,4	12,4	9,3	0,4
9	P-57	3,5	15,3	17,6	11,8	0,7
10	P-48	5,9	13,7	13,7	7,8	2
11	P-57	3,6	12,8	12,8	9,2	0,7
12	P-57	3,9	12,7	12,7	8,8	0,4
13	P-57	7,5	17,4	17,4	9,9	0,6
14 A	P-48	5,3	13,2	13,2	7,8	0,6
14 B	P-48	4,6	16,6	16,6	12	1,3
15	P-57	1,1	11,3	11,5	10,1	0,6
16	P-57	0,5	9,5	9,5	9	0,7
17	NS-44	13,9	30,1	30,1	16,2	2,7

Em geral as *squalls* observadas apresentaram uma duração relativamente curta, com um mínimo de 13 minutos (Tabela 4.2) e um valor médio de 1 hora. No entanto, é importante destacar que dois casos, especificamente os eventos 9 e 8, tiveram sua duração prolongada, ultrapassando o limiar de 2 horas. Isso ocorreu devido à persistência de valores elevados de velocidade do vento, que perduraram mesmo após atingir a velocidade de pico (v_p).

Vale destacar que, além da ocorrência de casos de *squalls* em que a velocidade do vento retorna rapidamente ao seu valor original, existem também aqueles em que a intensidade do

vento das séries temporais diminui lentamente após o pico do vento. Nesse contexto, Lu, Osaki e Wada (2017) ao investigarem eventos de *squall* na Costa do Japão, encontraram tipos de *squalls*, denominados tipo contínuo, tipo escada e tipo decaimento lento, que apresentam características de velocidade do vento diferentes após o pico do vento. Tal fato, justifica a ocorrência de casos com duração superior a 2 horas.

No que diz respeito ao tempo de subida, Duggal *et al.* (2011) optaram por dividi-lo em quatro grupos: tempo de subida muito curto ($t_r < 500s$), curto ($500s \geq t_r < 900s$), médio ($900s \geq t_r < 1200s$), longo ($\geq 1200s$). Ao aplicar essa classificação para as 17 *squalls* listadas na Tabela 4.2, obtém-se a seguinte distribuição: tempo de subida muito curto (casos 7,10 e 17), curto (1,3,11,14 e 16), médio (2,9,13 e 15), longo (4,5,6,8 e 12). Levando em consideração a classificação de Duggal *et al.* (2011), nota-se que as *squalls* tiveram, em sua maioria, um início relativamente rápido (total de 9 casos).

Na Tabela 4.2 observam-se valores de t_r entre 4 e 25 minutos, com um tempo de subida médio de 14,6 minutos. Este resultado é consistente com o estudo de Konga (2015), que a partir da análise estatística de dados de ventos, identificaram 95 eventos de *squall* na Nigéria ao longo de 463 dias e obteve o tempo médio de subida das *squalls* de cerca de 14 minutos, similar ao encontrado neste trabalho. Isso também é confirmado por Duggal *et al.* (2011), que obteve um tempo médio de subida de cerca de 900 segundos (15 minutos) para eventos de *squall* na África Ocidental, o que corrobora os resultados obtidos.

Os eventos caracterizados por uma ascensão (t_r) muito curta - especificamente os casos 7,10 e 17 - apresentaram também uma rápida descida (t_d). Em termos gerais, após atingirem o pico, as *squalls* alcançaram baixas velocidades em um intervalo de tempo relativamente curto, caracterizando um decaimento rápido. Entretanto, alguns casos tiveram um decaimento mais lento (casos 3, 4, 5, 8, 9, 15 e 16), indicando uma queda gradual da velocidade do vento.

Adicionalmente, ao realizar uma análise comparativa entre os resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, observa-se que os tempos de subida mais curtos estão associados às maiores taxas de variações.

Tabela 4.2 -Parâmetros relacionados à duração das *squalls*: Data de início (Data_início), tempo inicial (t_0), tempo de pico (t_p), tempo de máxima velocidade (t_{max}), tempo de subida (t_r) e tempo de descida (t_d), em minutos, data do fim (Data_fim), tempo final (t_f) e duração (t), em minutos. Considerando os 17 eventos de *squalls* identificados e suas respectivas localidades. Os horários estão expressos em UTC (*Coordinated Universal Time*).

O formato da data segue a ordem dia, mês e ano, enquanto o da hora é apresentado em minutos e segundos.

Nº	Local	Data_início	t_0	t_p	t_{max}	t_r [min]	t_d [min]	Data_fim	t_f	t [min]
1	P-48	21/10/2018	00:13	00:25	00:25	12	14	21/10/2018	00:42	29
2	P-48	05/03/2019	16:50	17:05	17:05	15	3	05/03/2019	17:08	18
3	P-57	05/07/2019	20:08	20:18	20:18	10	148	05/07/2019	20:24	16
4	P-48	21/08/2019	01:20	01:45	01:45	25	295	21/08/2019	02:34	74
5	P-48	09/10/2019	19:43	20:03	20:03	20	226	09/10/2019	20:42	59
6	P-57	11/11/2019	21:52	22:14	22:14	22	30	11/11/2019	23:18	86
7	P-48	11/02/2020	08:25	08:30	08:30	5	8	11/02/2020	08:45	20
8	P-57	23/02/2020	06:20	06:46	06:46	22	241	23/02/2020	09:12	172
9	P-57	01/03/2020	20:25	20:41	21:52	16	367	02/03/2020	02:37	372
10	P-48	24/06/2020	10:05	10:09	10:09	4	6	24/06/2020	10:18	13
11	P-57	16/01/2021	04:35	04:49	04:49	14	12	16/01/2021	04:53	18
12	P-57	07/03/2021	03:27	03:50	03:50	23	21	07/03/2021	04:10	43
13	P-57	31/03/2021	01:11	01:28	01:28	17	5	31/03/2021	01:40	29
14 A	P-48	18/04/2021	06:12	06:26	06:26	14	17	18/04/2021	07:00	48
14 B	P-48	18/04/2021	09:58	10:07	10:07	9	8	18/04/2021	10:23	25
15	P-57	28/04/2021	02:24	02:40	02:59	16	91	28/04/2021	03:07	43
16	P-57	09/06/2021	12:18	12:31	12:31	13	65	09/06/2021	12:33	15
17	NS-44	09/04/2022	20:56	21:02	21:02	6	3	09/04/2022	21:21	25

Ao analisar as condições pré-*squall*, identificou-se padrões notáveis no comportamento da velocidade do vento. Como ilustração, a Figura 4.1 exibe a série temporal de intensidade do vento do evento 10. É perceptível um intervalo em que a velocidade do vento apresentou pouca flutuação antes do seu rápido aumento, marcando o início da *squall*. Essa mesma característica também foi observada para os casos 9 e 13.

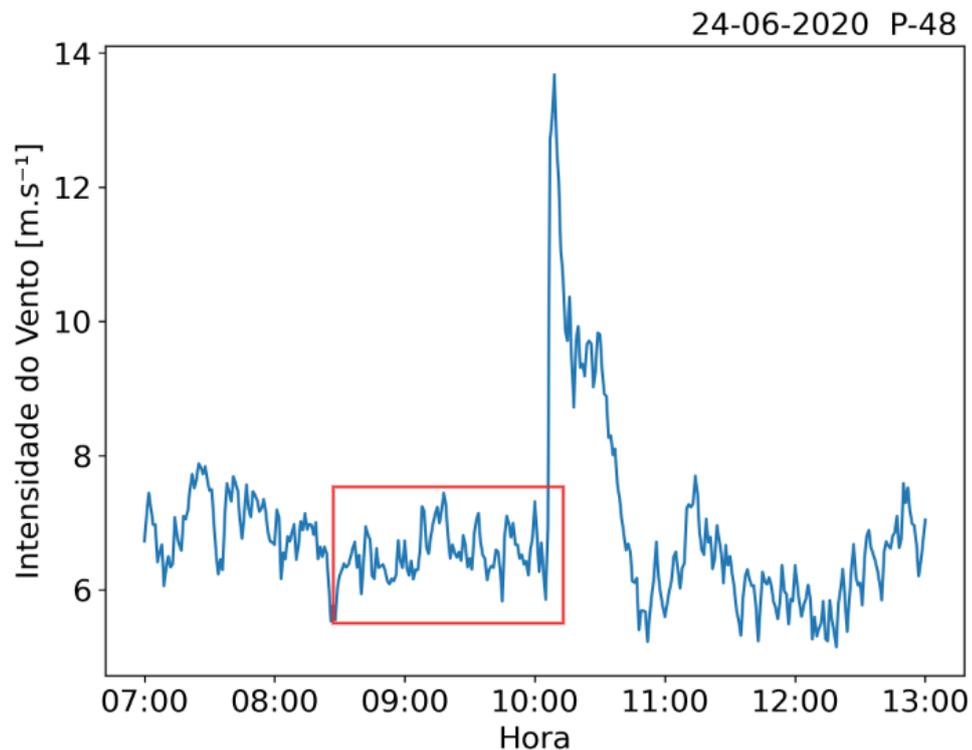


Figura 4.1 - Evolução temporal da intensidade do vento (m.s^{-1} - linha azul) do P-48 - para o dia 24 de Junho de 2020 no intervalo de 07Z às 13Z - caso 10. O retângulo vermelho destaca o período anterior a *squall* onde a velocidade do vento apresentou valores aproximadamente constantes.

Por outro lado, alguns eventos, especificamente os casos 4 e 15, demonstraram tendências distintas, caracterizadas por uma diminuição gradual (Figura 4.2-a) ou uma queda abrupta (Figura 4.2-b) da magnitude do vento antes da *squall*. Essas condições pré-*squall* também foram observadas para os casos 1, 8, 11, 15 e 16, evidenciando um declínio gradual, enquanto que nos casos 4, 5 e 12, houve uma diminuição repentina.

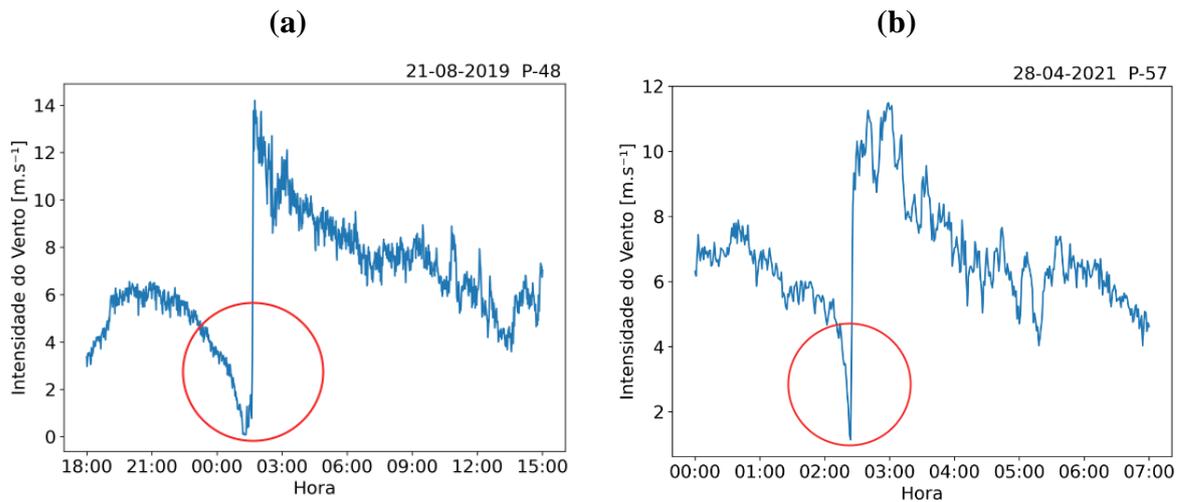


Figura 4.2 - Evolução temporal da intensidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ - linha azul): (a) P-48 - para às 18Z do dia 21/08/2019 até às 15Z do dia 22/08/2019 - caso 04. (b) P-57 - para o dia 28/04/2021 no intervalo de 00Z às 07Z - caso 15. O círculo vermelho destaca o período pré-*squall*.

4.1.2 Direção do vento

Na Tabela 4.3, encontram-se os resultados da análise da direção do vento para um intervalo de 30 minutos que antecede o início das *squalls* e durante o período de aumento da velocidade do vento (tempo de subida). Nota-se uma considerável variabilidade na direção das *squalls*, sendo as direções Nordeste (NE) e Leste (E) as mais predominantes. De acordo com Oberlies, Guha e Slocum (2015) e Naciri e Chitrapu (2019), as *squalls* na África Ocidental podem ocorrer em qualquer direção da rosa dos ventos, sendo que as direções mais frequentes ocorrem entre NE e SE. Resultados semelhantes foram observados por Mariani *et al.* (2017) para o Noroeste da Austrália, onde se destaca a maior ocorrência de direções do vento de quadrante leste para as *squalls*, o que corrobora os resultados obtidos. No entanto, a interpretação de detalhes adicionais torna-se um desafio devido à limitação no número de casos deste estudo.

Na maioria dos casos, foram identificadas mudanças substanciais na direção do vento, abrangendo ângulos de até 180° , com variações ocorrendo tanto antes como durante a ocorrência das *squalls*. No entanto, é relevante ressaltar que em determinadas situações (eventos 1, 6, 8, 10, 11 e 14), as *squalls* apresentaram mudanças de direção com ângulos relativamente pequenos (menores que 25°), caracterizadas como "estáveis" na Tabela 4.3. Oberlies, Guha e Slocum (2015) também identificaram *squalls* na região da África Ocidental com direções do

vento que permaneciam relativamente constantes durante todo o evento e outras com substanciais variabilidades.

Adicionalmente, destaca-se que ocorreram mudanças complementares no direção do vento (casos 3, 5, 7, 9, 12, 13, 15 e 17), onde a variação total (Δdir_{total}) foi obtida pela soma das variações da direção antes (Δdir_{antes}) e durante o evento de *squall* ($\Delta dir_{durante}$). Todavia, também aconteceram mudanças não complementares (casos 4 e 16), ou seja, a direção do vento apresentou significativas variações antes do início da *squall* e, posteriormente, ocorreu outra alteração durante o período de aumento da velocidade. Estas mudanças, diferentemente do caso complementar, não representaram uma sequência contínua de variações na direção do vento.

É importante observar que o caso 2 foi o único a registrar mudanças na direção do vento exclusivamente durante o evento de *squall*. Além disso, em seis eventos (casos 5, 7, 12, 13, 16 e 17), foi identificada uma variação total na direção do vento superior a 90°, sendo que as mudanças mais significativas ocorreram simultaneamente com a variação da velocidade do vento.

No que se refere a taxa máxima de variação da direção ($max\Delta dir$), observa-se, em sua maioria, a ocorrência de valores relativamente pequenos, variando entre 4,4 e 33,3 graus por minuto. No entanto, os casos 4, 9 e 16 se destacam por apresentarem valores elevados para $max\Delta dir_{antes}$, ao passo que as *squalls* 4, 15 e 16 registraram maiores $max\Delta dir_{durante}$.

Tabela 4.3 - Parâmetros relacionados à direção do vento. A Direção da *Squall* [Norte (N), Nordeste (NE), Leste (E), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SW), Oeste (W) e Noroeste (NW)]. Tipo de variação: estável (sem variação significativa), durante (durante a variação da velocidade do vento), antes + durante (mudança complementar) e antes / durante (mudança não-complementar). Δdir_{antes} e $\Delta dir_{durante}$: variação da direção para, respectivamente, 30 minutos antes e durante o evento de *squall*, em graus. $max\Delta dir_{antes}$ e $max\Delta dir_{durante}$: taxa máxima de variação da direção para, respectivamente, 30 minutos antes e durante o evento de *squall*, em graus por minuto. Δdir_{total} : variação total da direção do vento, em graus. Considerando os 17 eventos de *squalls* identificados e suas respectivas localidades.

N°	Local	Direção da <i>Squall</i>	Tipo de variação	Antes		Durante		Total
				Δdir_{antes} [graus]	$max\Delta dir_{antes}$ [graus/min]	$\Delta dir_{durante}$ [graus]	$max\Delta dir_{durante}$ [graus/min]	Δdir_{total} [graus]
1	P48	W	estável	4,6	5,8	13,6	12,4	13,6
2	P48	E	durante	2,7	5,4	47,8	15,3	47,8
3	P57	W	antes + durante	38,14	23,7	45,7	13,3	83,8
4	P48	W	antes / durante	65,6	64,5	49,2	179,4	65,6
5	P48	W	antes + durante	37,6	8,8	61,3	26,1	98,9
6	P57	NE	estável	17,9	5,4	7,8	8,8	17,9
7	P48	NE	antes + durante	83,2	15,7	23	33,3	106,2
8	P57	E	estável	11,6	20,8	11,2	18,2	11,6
9	P57	NE	antes + durante	42,2	158,1	10,1	7,9	52,3
10	P48	E	estável	0,6	4,4	18,1	14,1	18,1
11	P57	NW	estável	4,1	24,7	22,3	6,3	22,3
12	P57	SE	antes + durante	52,5	6,8	43,4	32,2	95,9
13	P57	SE	antes + durante	31,5	4,7	110,1	26,1	141,6
14-A	P48	E	estável	7,5	8,5	10	10,4	10
14-B	P48	E	estável	6,3	10,9	9,6	12,5	9,6
15	P57	NE	antes + durante	53	12,7	33,3	87,5	86,3
16	P57	NE	antes / durante	67,8	174,9	114,6	168,3	114,6
17	NS-44	S	antes + durante	42,7	9,6	62	16,5	104,7

Ao comparar os resultados da caracterização da intensidade e direção do vento das *squalls* (Tabelas 4.1 e 4.3), observa-se que os eventos, que exibiram as maiores variações de velocidade do vento (casos 4, 5, 7, 9, 15 e 17), estiveram associados a variações antes e durante os eventos de *squall*, com valores de direção superiores a 45°. Uma exceção a esta afirmação foi o caso de *squall* consecutiva (evento 14), o qual não apresentou mudanças significativas na direção do vento para ambas situações.

4.2 Classificação das *squalls*

As *squalls* encontradas para as Bacias de Santos e de Campos foram categorizadas com base na condição do vento após o pico e na configuração da série temporal. Conforme ilustrado na Figura 4.3, identificaram-se *squalls* de todos os seis tipos mencionados por Lu, Osaki e Wada (2017), a saber: Pico isolado (7 ocorrências), Decaimento lento (4), Topo plano (3), Escada (1), Contínuo (1) e Pico duplo (1). Destaca-se que a categoria de *squall* pico isolado foi a mais predominante, abrangendo 41,2% das ocorrências, seguida pelo tipo decaimento lento, com 23,5% dos casos.

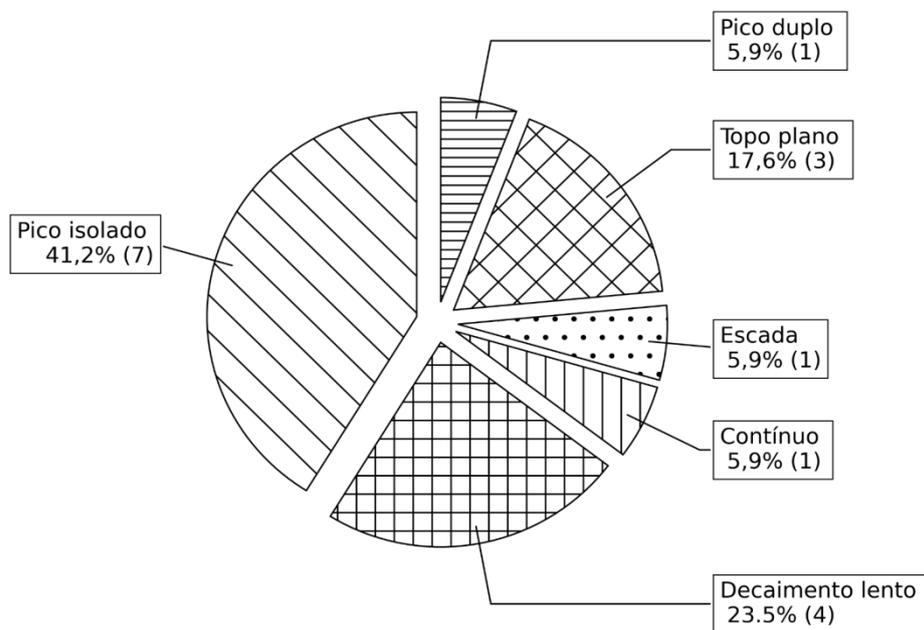


Figura 4.3 - Percentual e número de ocorrência de *squalls* (entre parênteses) do tipo Pico isolado, Pico duplo, Topo plano, Contínuo, Escada e Decaimento lento.

Na Figura 4.4, estão exemplificados os casos de *squalls*, cada um representando um dos seis tipos de modelo mencionados: Pico isolado (Casos 1, 2, 3, 7, 10 e 11), Pico duplo (Caso 14), Decaimento lento (Casos 4, 5, 6 e 15), Topo plano (Casos 12, 13 e 16), Contínuo (Caso 8) e Escada (Caso 9).

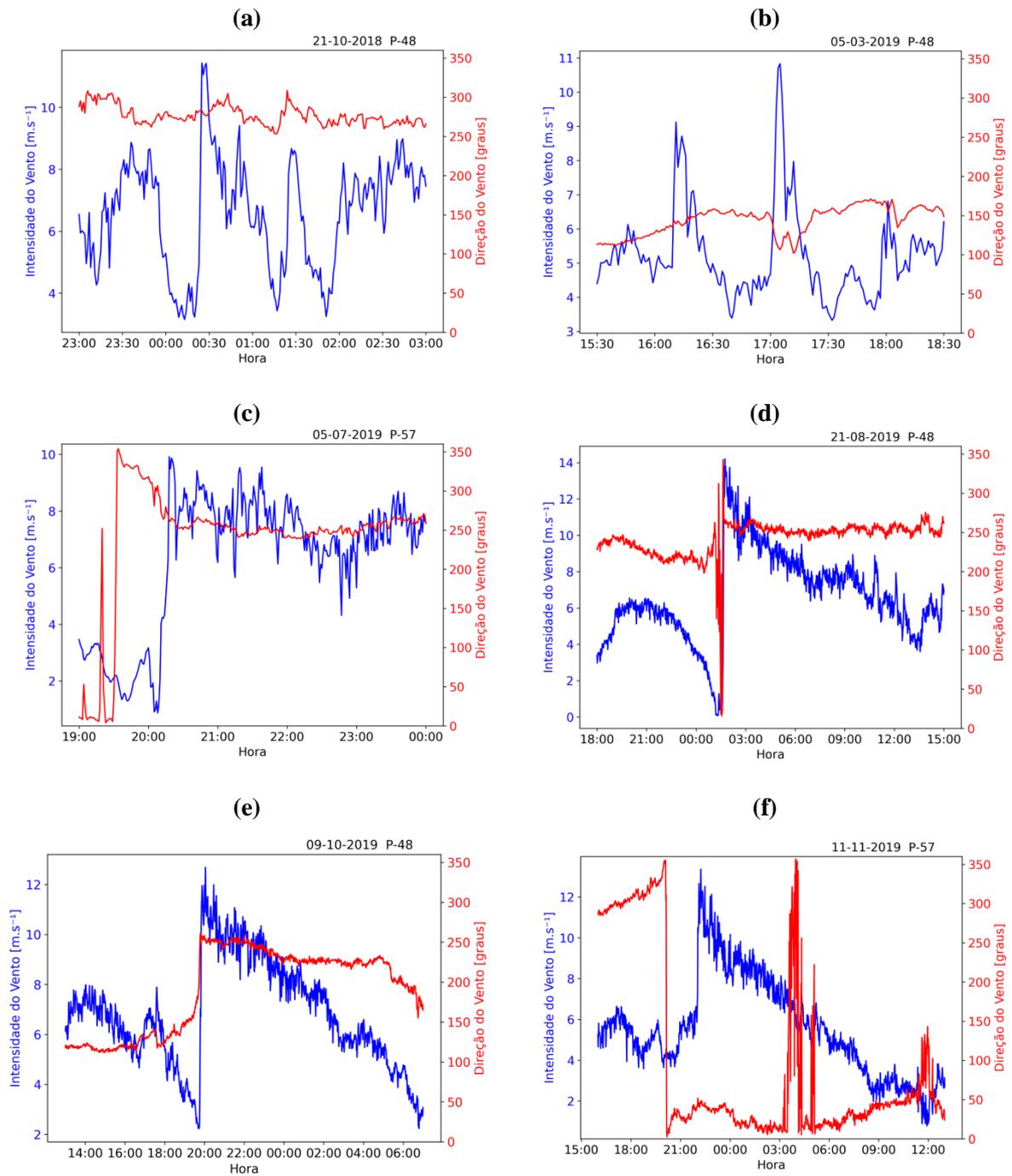


Figura 4.4 - Evolução temporal da intensidade do vento (m.s^{-1} - linha azul) e direção do vento (graus - linha vermelha) para exemplificar as *squalls* do tipo: (a) pico isolado - caso 1, (b) pico isolado - caso 2, (c) pico isolado - caso 3, (d) decaimento lento - caso 4, (e) decaimento lento - caso 5, (f) decaimento lento - caso 6, (g) pico isolado - caso 7, (h) contínuo - caso 8, (i) escada - caso 9, (j) pico isolado - caso 10, (k) pico isolado - caso 11, (l) topo plano - caso 12, (m) topo plano - caso 13, (n) pico duplo - caso 14, (o) decaimento lento - caso 15, (p) topo plano - caso 16. Continua.

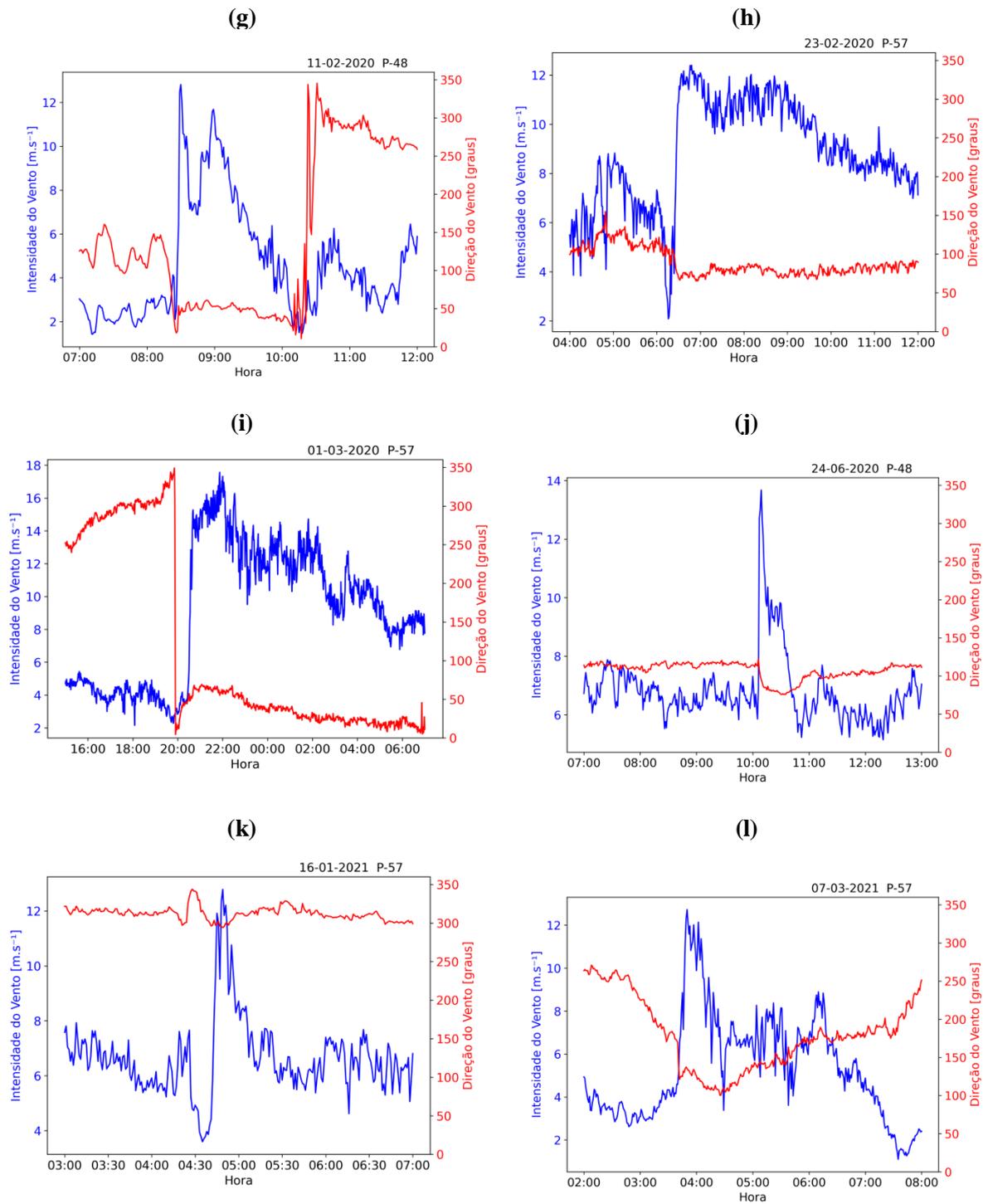


Figura 4.4 - Continuação. Exemplificação dos casos 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

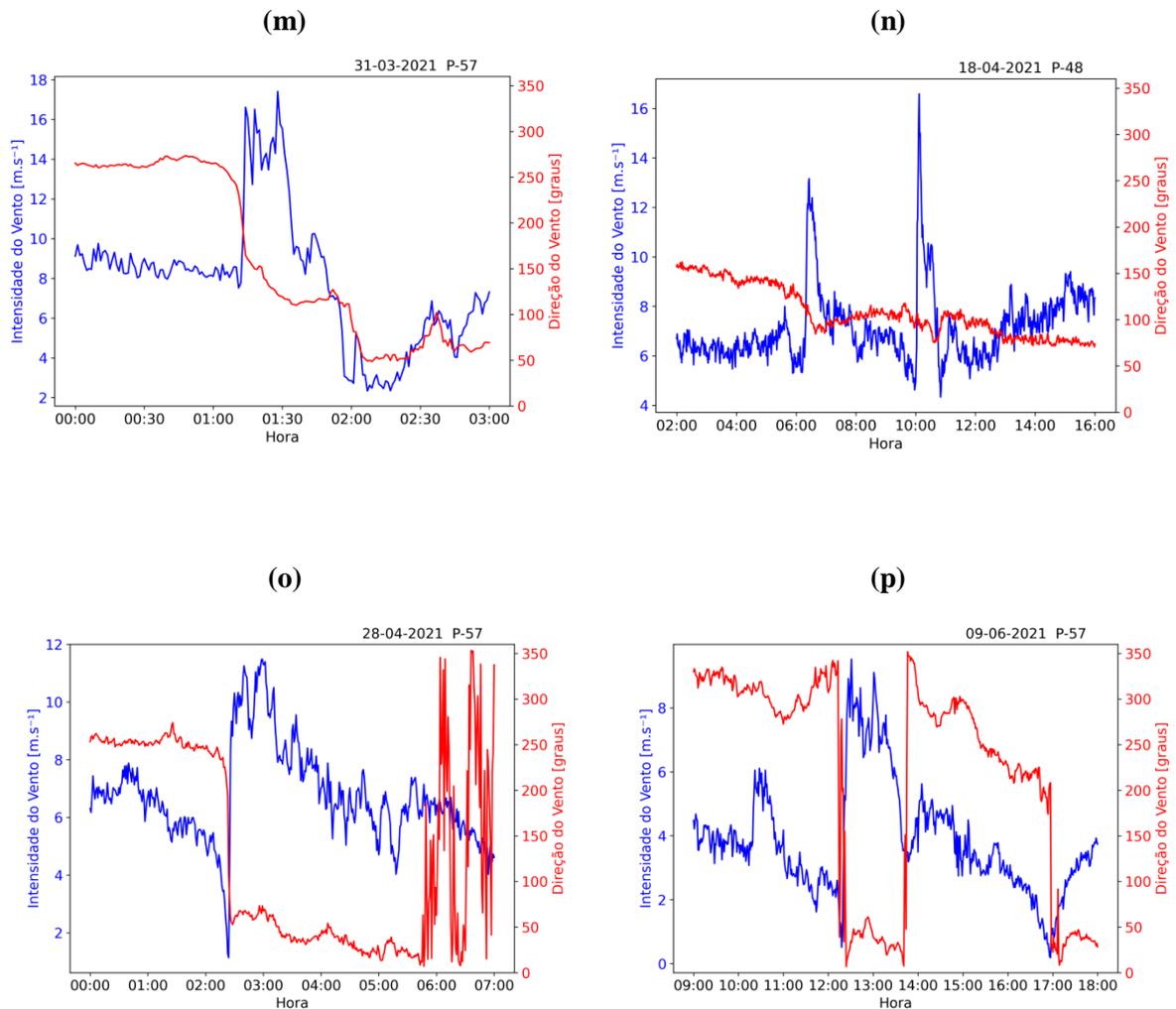


Figura 4.4 - Continuação. Exemplificação os casos 13, 14, 15 e 16.

Nota-se que os casos 8 e 9, que tiveram durações prolongadas que excederam o limite de 2 horas, foram classificados como *squall* do tipo contínuo (Figura 4.4-h) e escada (Figura 4.4-i), respectivamente. Vale mencionar, que os casos do tipo pico isolado foram categorizados por tempos de subida muito curto ($t_r < 500s$), taxas de variação da velocidade mais elevadas e os menores tempos de descida.

No que concerne à direção do vento, as *squalls* do tipo pico isolado (casos 1, 2, 3, 7, 10, 11 e 17) e topo plano (casos 12, 13 e 16), foram as que apresentaram as maiores mudanças na direção do vento. No entanto, o mesmo não se aplicou para o evento de *squall* do tipo pico duplo (Gráfico 4.4-n). Adicionalmente, todos os casos de *squall* do tipo topo plano exibiram

variações da direção do vento tanto antes quanto durante o rápido aumento da velocidade do vento.

De acordo com Lu, Osaki e Wada (2017), dos seis modelos existentes, os tipos pico duplo, escada, decaimento lento e topo plano são, em parte, derivados dos tipos pico isolado e contínuo. Ademais, os autores constataram que as *squalls* do tipo pico isolado são as mais comuns, e, predominantemente aquelas com grandes mudanças na direção do vento, o que confirma os resultados obtidos.

4.3 Estudo de caso

Entre os diferentes casos examinados, foi escolhido o evento mais significativo e recente de *squall* (designado como caso 17 na Tabela 4.1), ocorrido em 09 de abril de 2022, sobre o Navio-sonda NS-44 (*Laguna Star*) da PETROBRAS, localizado na Baía de Santos. No transcurso desse dia, por volta das 21Z, a sonda de perfuração conectada a um poço de petróleo perdeu sua posição devido a uma brusca variação tanto na intensidade quanto na direção do vento. Durante esse episódio, foi recebido um aviso sobre a ocorrência iminente de *squall* por parte da StormGeo, a empresa contratada pela PETROBRAS para prestação de serviços. A intensificação e mudança de direção do vento causaram uma sobrecarga ambiental que comprometeu a capacidade do sistema de posicionamento da unidade, levando à perda de sua posição. Felizmente, não houve qualquer prejuízo ambiental, material ou humano.

No dia do evento, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) emitiu um alerta de ventos intensos (entre 60-100 km/h), com possibilidade de rajadas, para parte da região Sudeste do Brasil, incluindo o litoral do Rio de Janeiro (RJ) e São Paulo (SP) (<https://alertas2.inmet.gov.br/38640>). Estações costeiras registraram ventos de até 15 KT em Ilhabela (SP - SiMCosta) entre 14Z-18Z, e rajadas de até 17,5 KT na estação da Marambaia (RJ - INMET).

A análise dos dados observados indica que às 20:56 UTC (conforme Figura 4.5), ocorreu um súbito aumento na velocidade do vento a 10 metros da superfície do mar no NS-44, e num intervalo de seis minutos, a velocidade do vento passou de 13,9 m/s para 30,1 m/s, representando uma variação de intensidade de aproximadamente 16,2 m/s, ou seja, taxa de aumento de 2,7 m/s por minuto. Portanto, a velocidade máxima alcançada foi de 30,1 m/s, e ocorreu às 21:02 UTC, com um tempo de subida (ascensão) de seis minutos. Logo em seguida,

a velocidade do vento diminuiu rapidamente para 12,7 m/s após seis minutos adicionais (21:08 UTC).

Além do aumento da velocidade do vento, ocorreram mudanças na direção, alterando-se de Leste-Nordeste (ENE) para Sul (S) [ver Figura 4.5], registrando uma variação superior a 90° ($\Delta dir_{total} = 104,7^\circ$).

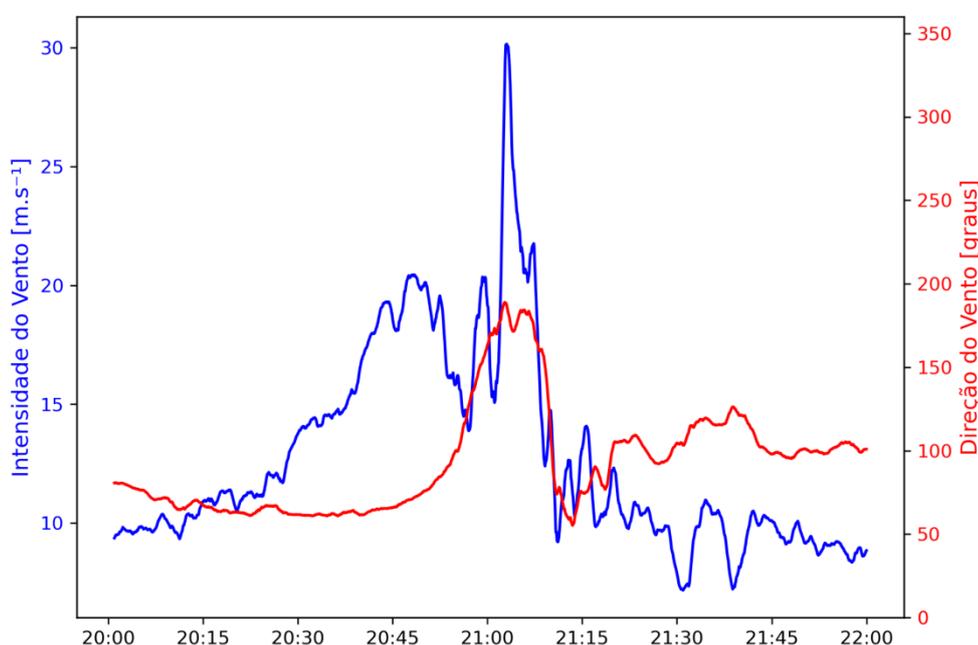


Figura 4.5 - Evolução temporal da intensidade do vento ($m.s^{-1}$ - linha azul) e direção do vento (graus - linha vermelha) do NS-44 - para o dia 09 de Abril de 2022 no intervalo de 20Z às 22Z.

4.3.1 Análise sinótica

No dia 09 de abril de 2022 às 12Z, nota-se a atuação de um sistema de alta pressão pós-frontal com centro de 1026 hPa próximo a Costa Sul do Brasil (Figura 4.6-b), que favorecia o transporte de umidade do oceano para o continente. Na imagem de satélite (Figura 4.6-a), observa-se a presença de nebulosidade sobre a área de interesse, devido a atuação de um cavado na região da Baía de Santos, conforme indicado na carta sinótica da Marinha do Brasil (Figura 4.6-b). Entretanto, a análise dos campos de PNMM (Figura 4.7) indicou a formação de uma baixa pressão próxima ao limite entre o litoral do Rio de Janeiro e de São Paulo ($24^\circ S$ $045^\circ W$), com centro de 1014 hPa, prolongando-se sobre o oceano.

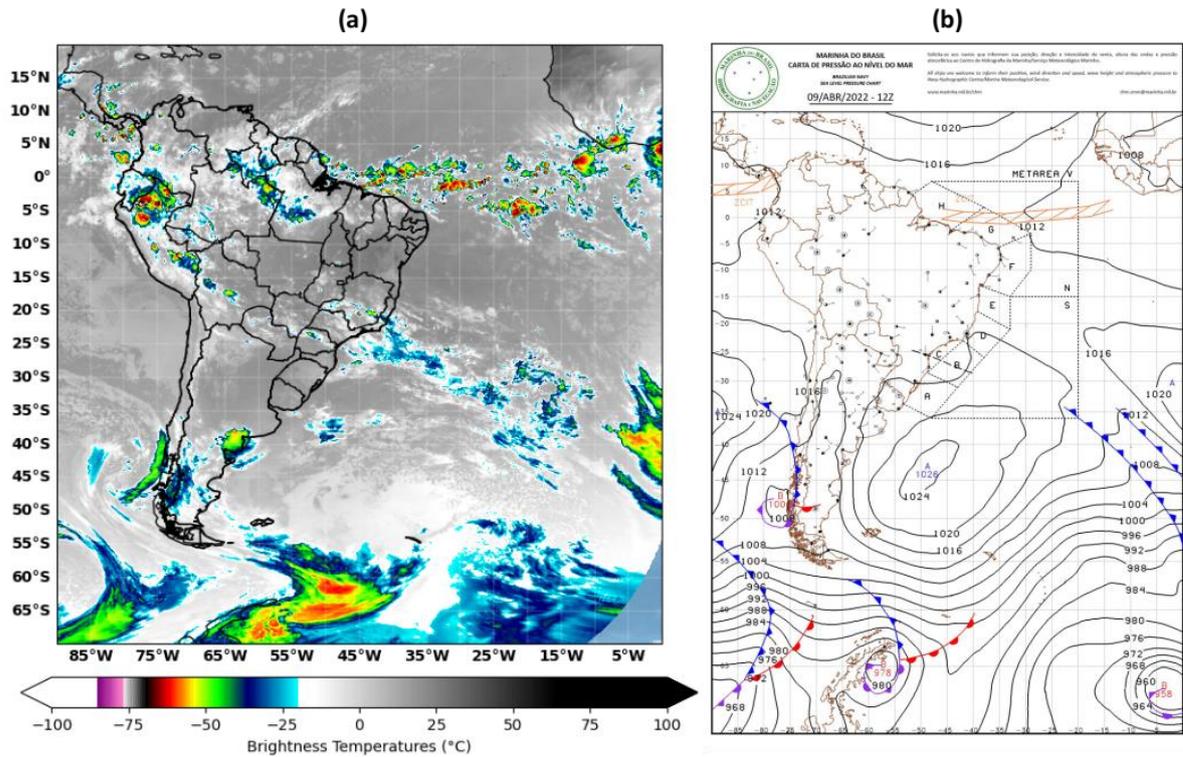


Figura 4.6 - 09 de abril de 2022 às 12Z (a) imagem de satélite no canal do infravermelho (canal 13) e (b) carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil. Fonte: DHN.

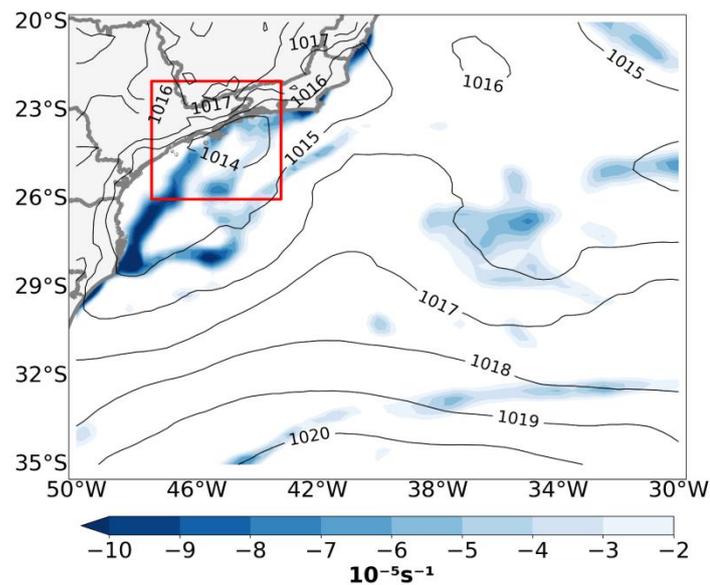


Figura 4.7 - PNMM (hPa) em linhas e Vorticidade Relativa ($10^{-5} s^{-1}$) em 1000 hPa em tons de azul para o dia 09 de abril de 2022 às 12Z. O quadrado vermelho indica a região de formação da baixa pressão.

Durante o dia observou-se o desenvolvimento de nebulosidade mais profunda sobre o oceano, próximo à 25°S 043°W, onde às 21Z havia nuvens convectivas com temperatura de topo inferior a -70°C (Figura 4.8-a). No campo de PNMM e Vorticidade Relativa (VR) em 1000 hPa nota-se mínimos de pressão e VR, deslocados um do outro, porém na mesma região de nebulosidade convectiva destacada na imagem de satélite (Figura 4.8-b). Ademais, há uma circulação ciclônica em 850 hPa, nessa mesma área, com alto conteúdo de umidade disponível para manutenção da convecção (Figura 4.8-c). Além de outros fatores, a convergência de umidade contribui para o abaixamento de pressão. Dessa forma, o conteúdo de umidade em baixos níveis é transportado para níveis superiores, favorecendo a formação de nuvens profundas.

A VR negativa é muito utilizada para identificação de sistemas sinóticos no Atlântico Sul, pois permite a detecção de sistemas fracos e que se deslocam rapidamente (Gramscianinov *et al.*, 2020; Sinclair, 1994), como identificador da convecção em superfície (Melo; Palmeira; Menezes, 2022), podendo também ser utilizada para estimar o vento próximo ao seu mínimo. Rodrigues *et al.* (2019) propuseram uma escala de VR na qual cada fenômeno meteorológico responde em faixas de intensidade, e as associaram com a escala *Beaufort* que relaciona possíveis danos com a velocidade do vento (WMO, 2008). Seguindo a escala de VR, fenômenos na faixa de $-3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4.8-d), possuem velocidades máximas do vento que podem atingir até 30 KT [vento forte de acordo com a WMO (2008)] e são classificados como cavados, corroborando com a carta sinótica da Marinha do Brasil (Figura 4.6-b). Com isso, sabe-se que a convergência de umidade foi essencial para o desenvolvimento do sistema de baixa pressão em superfície, e que os ventos eram fortes no horário do acidente.

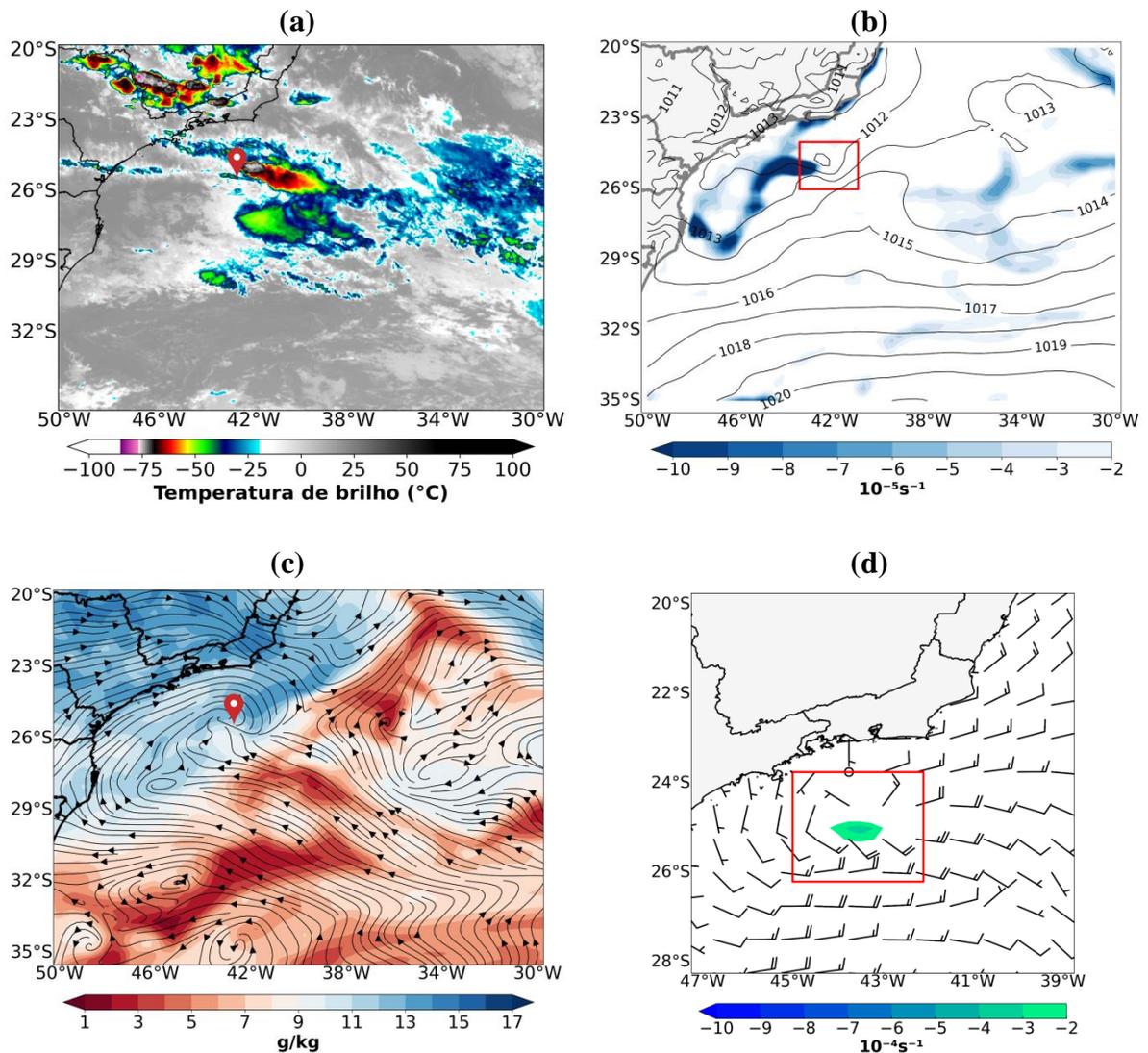


Figura 4.8 - 09 de abril de 2022 às 21Z. (a) Imagem de satélite no canal do infravermelho (canal 13); (b) PNMM (hPa) em linhas e VR (10^{-5} s^{-1}) em tons de azul; (c) Vento (m/s) em linha de corrente e umidade específica (g/kg) em 850 hPa; (d) Vento a 10 m (kt) em barbela e Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1}) em 1000 hPa em tons de azul e verde. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da *squall*, enquanto o retângulo vermelho delimita a região do cavado em baixos níveis.

Considerando apenas a contribuição da componente de altos níveis para intensificação do evento observa-se que o Jato de Altos Níveis (JAN) atuava sobre a Bacia de Santos. Da mesma forma, a convecção em superfície – indicada pelo ponto vermelho na Figura 4.9-a (onde foi registrado o evento de *squall*) – localiza-se na Entrada Equatorial do jato, visto que a componente meridional do vento ageostrófico (vag) encontra-se direcionada para sul, favorecendo a divergência em altos níveis, como observado na Figura 4.9-b.

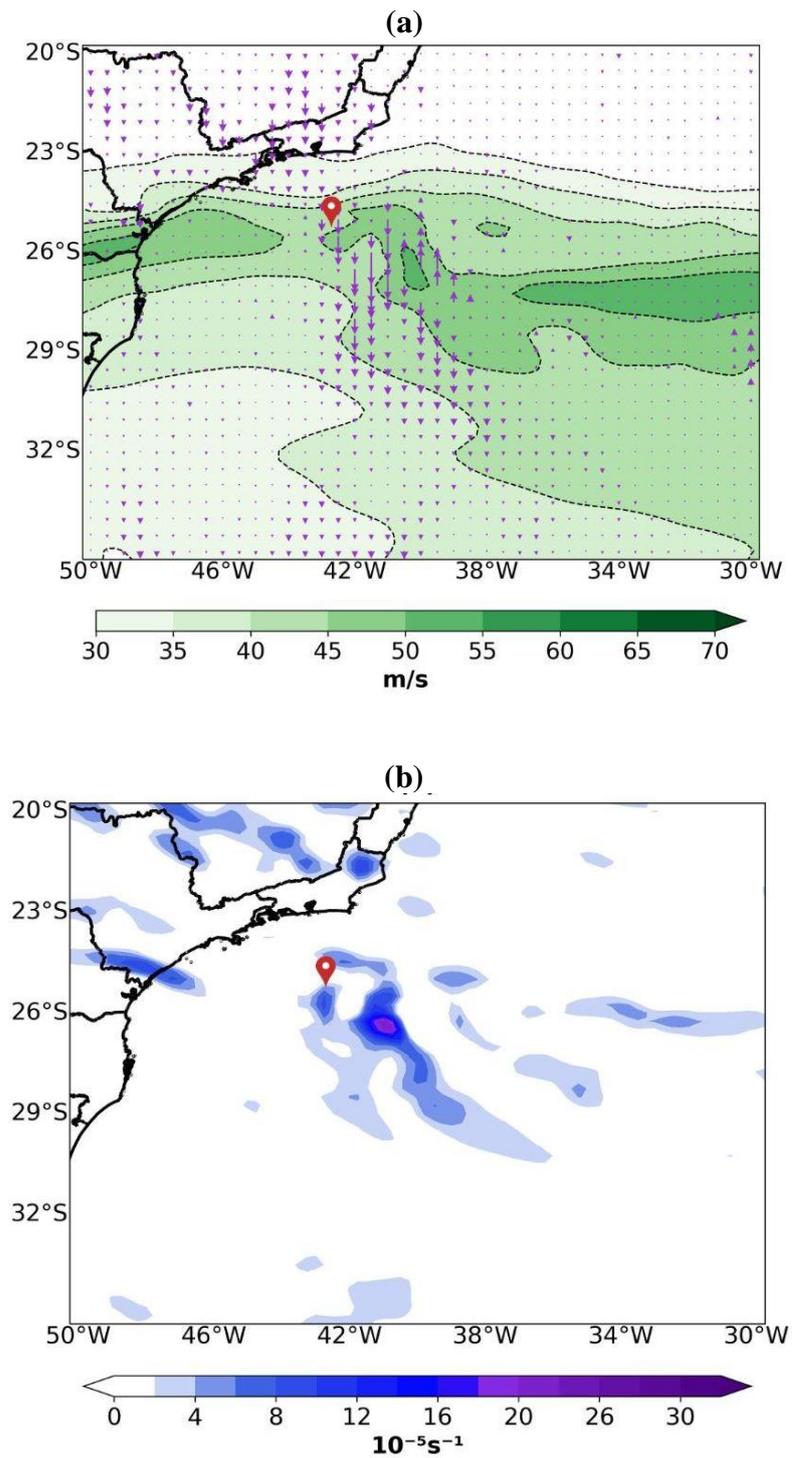


Figura 4.9 - (a) Magnitude do vento (m/s) em tons de verde e componente meridional do vag em setas roxas para o nível de 200 hPa. (b) Divergência do vento (10^{-5} s^{-1}) em 200 hPa em sombreado, para o dia 09 de abril de 2022 às 21Z. O ponto em vermelho indica a posição do cavado em baixos níveis.

A TSM (Figura 4.10-a) apresentou valores superiores a 27°C na região da Bacia de Campos e na área mais ao norte da Bacia de Santos, um valor acima ao da climatologia, e ultrapassa o limiar crítico de $26,5^{\circ}\text{C}$ descrito na literatura (Gray, 1968). Ressalta-se que a TSM acima da normal climatológica provê energia para a manutenção do sistema de baixa pressão em superfície através da liberação de calor latente.

Adicionalmente, a presença de anomalia negativa de TSM [Figura 4.10-b] próxima a costa do Rio de Janeiro (23°S e 042°W), contribuiu para acentuar a circulação entre o oceano e o continente, conforme Chaves (2011) mostrou em seu trabalho. E a presença de anomalia positiva de TSM (instabilizando a atmosfera), próxima ao local de ocorrência da *squall*, favoreceu a formação de nuvens convectivas.

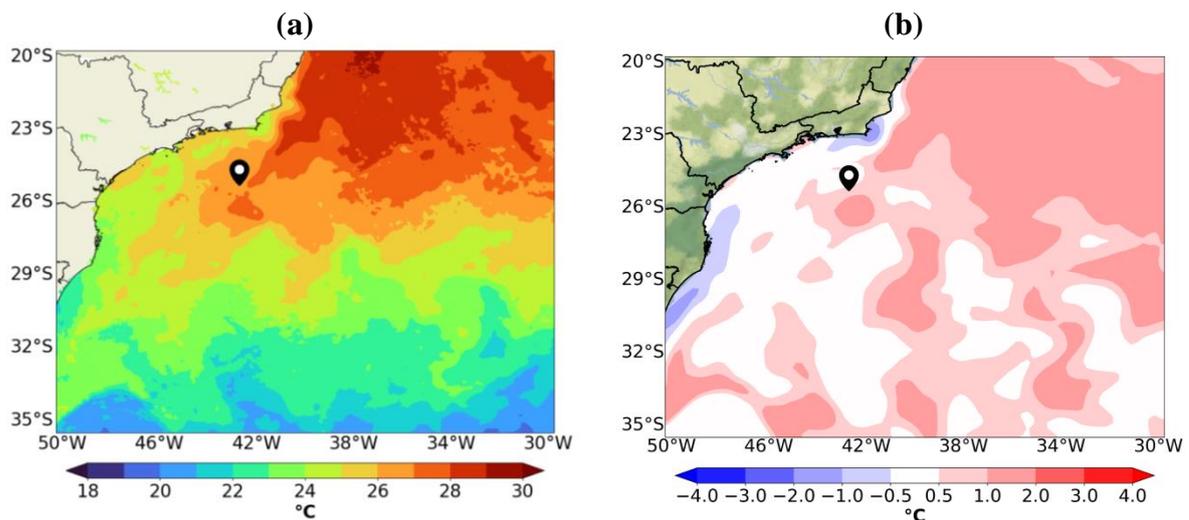


Figura 4.10 - 09 de abril de 2022. (a) TSM MUR ($^{\circ}\text{C}$) sombreado colorido. (b) Anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$) em tons de azul e vermelho. O ponto em preto indica o local de ocorrência da *squall*.

4.3.2 Análise termodinâmica

A Figura 4.11 ilustra a sondagem plotada em um diagrama Skew-T, observada pela radiossondagem do Aeroporto Internacional do Galeão (SBGL) das 12Z do dia 09/04/2022, através do *Software* RAOB do Alerta Rio (Sistema de Previsão e alerta de chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro). Nesta Sondagem, nota-se que a atmosfera tinha potencial para a formação de correntes descendentes e ventos convectivos, por apresentar camadas notadamente mais secas em níveis médios da atmosfera (destacada na elipse azul na Figura 4.11). Essa camada

mais seca impacta diretamente no Índice DCAPE que é um indicador para o potencial da velocidade de correntes descendentes associadas a tempestades que estejam em contato com esse ambiente. A DCAPE ultrapassou o valor de 1100 J/kg, valendo citar que valores de DCAPE iguais ou acima de 1000 J/kg são considerados bastante favoráveis a correntes descendentes intensas, e consequentemente, a eventos de ventos intensos em superfície (Nascimento, 2005; Pereira, 2015; Franco; Menezes; Vasconcellos, 2020).

Vale ainda mencionar que a sondagem do Galeão, apesar de apresentar um valor pequeno de CAPE, essa sondagem é do horário das 12Z (9h da manhã – horário local), e é bastante comum que, com o aumento da temperatura em superfície durante o dia, a CAPE desse ambiente se eleve consideravelmente, podendo atingir valores altos.

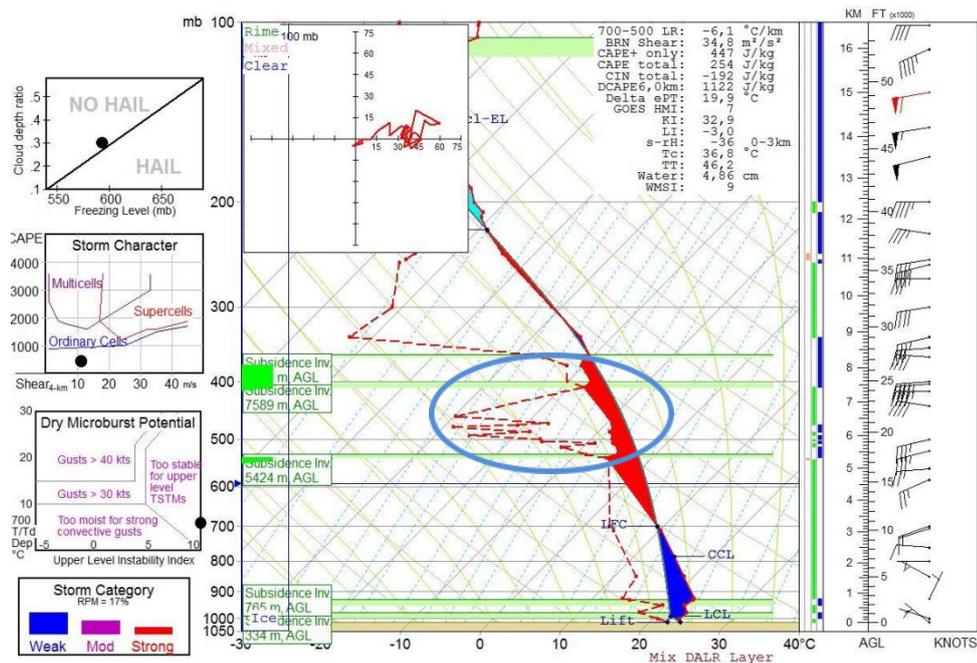


Figura 4.11 - Diagrama Skew-t Log P para o dia 09 de abril de 2022 às 12Z. Radiossondagem do SBGL (22,81°S / 043,25°W) a partir do *Software* RAOB do Alerta Rio. A elipse azul destaca a camada seca em níveis médios.

Na Figura 4.12, observam-se dois diagramas Skew-t construídos a partir de informações da reanálise ERA5 para a Região onde a tempestade em questão teve o seu disparo (Figura 4.12-a) e para a região onde o evento de *Squall* ocorreu (Figura 4.12-b), sendo esta para às 20Z, horário mais próximo ao do evento estudado. No local de disparo da tempestade que provocou o evento de *Squall*, a sondagem representada pelos dados do ERA5, às 12Z (Figura 4.12-a) mostra que a CAPE exibia valores maiores que os registrados no Galeão (Figura 4.11), em torno de 1000 J/kg, e existiam camadas secas em níveis médios que, favorecem correntes descendentes e a propagação da tempestade. E, finalmente, no local da ocorrência do evento de *Squall*, o perfil vertical obtido a partir de informações do ERA5 para às 20Z (Figura 4.12-b) revela que uma camada profunda de ar seco se encontrava em níveis médios atmosféricos, se estendendo desde os 700 hPa até níveis acima de 300 hPa (destacada pela elipse preta na Figura 4.12-b). Essa característica observada nesta sondagem indica que a atmosfera estava com um potencial grande para a formação de correntes descendentes intensas em tempestades que atuassem nessa região, e consequentes ventos convectivos também intensos.

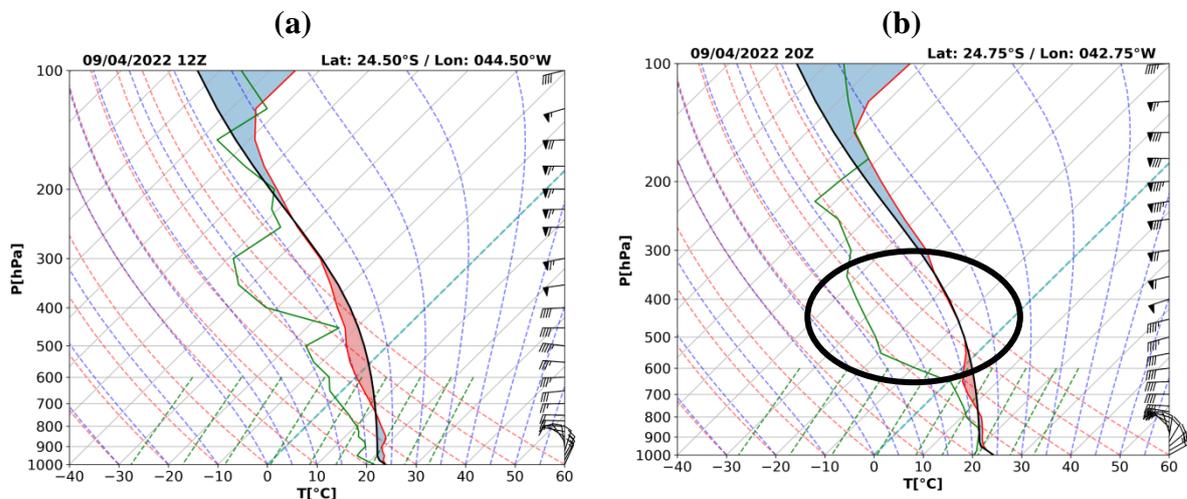


Figura 4.12 - Diagramas Skew-t Log P gerados a partir de informações da reanálise ERA5 para o dia 09 de abril de 2022 às: (a) 12Z - para a região onde a tempestade teve o seu disparo (24,50°S / 044,50°W) e (b) 20Z - para o local onde ocorreu a *squall* (24,75°S / 042,75°W). A elipse preta destaca a camada seca em níveis médios e altos.

Em relação ao ambiente termodinâmico do caso NS-44, inicialmente considerou-se a análise dos índices para atmosfera pré-convectiva, que incluem o CAPE, o índice TT e o índice

K, tanto para o instante em que a tempestade começou a se formar, quanto aproximadamente 1 hora antes do início da *squall*. Em seguida, procedeu-se com a avaliação dos perfis longitudinais de umidade relativa e umidade específica, juntamente com os índices sensíveis à ocorrência de vento, sendo eles, o índice KO e o índice SHEAR, somente para o instante imediatamente anterior ao início da *squall*.

Às 12Z do dia 09 de abril de 2022 (Figura 4.13-a), observa-se valores baixos de CAPE, inferiores a 1000 J.kg^{-1} , na região de formação da baixa pressão em superfície, indicando uma instabilidade convectiva fraca. Contudo, é válido salientar que o cálculo do CAPE a partir de conjuntos de dados baseados em estimativas, como as saídas de modelos numéricos e reanálises, pode ser afetado pelas informações de temperatura e umidade em baixos níveis, cuja representação nem sempre são bem representadas por esses conjuntos de dados (Nascimento, 2005), o que resulta em valores de CAPE sistematicamente reduzidos (Berkes *et al.*, 2012).

Decorrido um período de 8 horas (Figura 4.13-b), o CAPE registrou valores significativos (maiores que 1000 J.kg^{-1}) próximo ao local de ocorrência da *squall*, indicando que atmosfera estava instável cerca de 1 hora antes do início do evento, ou seja, com valores acima do valor crítico estabelecido, o que implica um alto potencial para formação de tempestades.

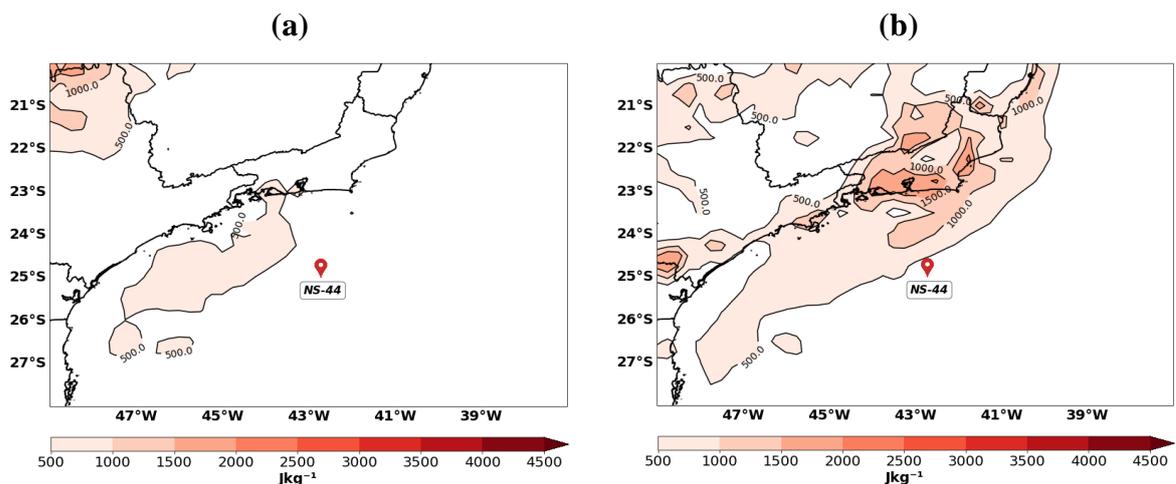


Figura 4.13 - CAPE (J.kg^{-1}) acima de 500 J.kg^{-1} sombreado em tons de vermelho e linhas em preto, para o dia 09/04/2022 às: (a) 12Z e (b) 20Z. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da *squall*.

A Figura 4.14 exibe os campos espaciais dos índices TT e K, correspondentes aos horários em que a análise do CAPE foi conduzida. No momento da formação da tempestade, o índice TT apresentou valores significativos, excedendo 48°C na região de interesse [Figura 4.14-a]. Esse cenário sugere a existência de um *lapse rate* (taxa vertical de variação da temperatura) considerável entre baixos e médios níveis, criando condições favoráveis para a ocorrência de tempestades.

Ademais, o índice K também exibiu valores substancialmente elevados (Figura 4.14-c), ultrapassando 34°C, o que é bastante alto de acordo com a literatura, e demonstra uma atmosfera com um teor significativo de umidade desde 850 até o nível de 700 hPa, o que confere um alto potencial para tempestades convectivas e chuvas fortes.

Próximo ao início da *squall*, ambos os índices continuaram elevados, com valores de TT em torno de 42°C (Figura 4.14-b) e K maiores que 34°C (Figura 4.14-d) nas imediações do local onde a *squall* ocorreu. De uma forma geral, ambos os índices (TT e K) indicaram valores significativos, o que sugere uma tendência de desenvolvimento de alta precipitação acumulada (chuvas torrenciais), conforme destacado por Silva Dias (2000).

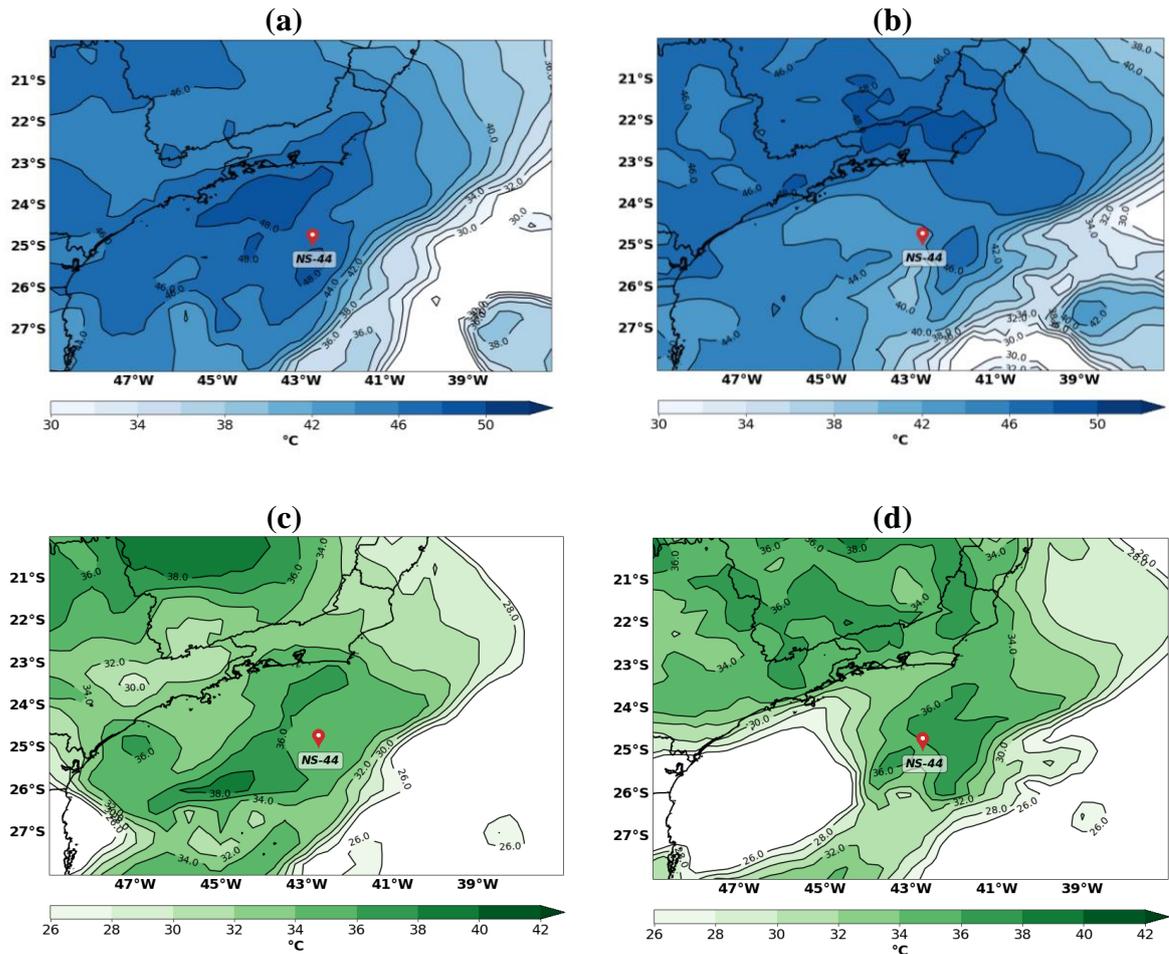


Figura 4.14 - Índice TT ($^{\circ}\text{C}$) acima de 30°C sombreado em tons de azul e linhas em preto (Linha superior) e Índice K ($^{\circ}\text{C}$) acima de 26°C sombreado em tons de verde e linhas em preto (Linha inferior). Para o dia 09/04/2022 às: (a) e (c) 12Z e (b) e (d) 20Z. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da *squall*.

É importante considerar que mesmo que haja uma camada de baixa umidade relativa logo acima do nível de 700 hPa, ela não será levada em conta pelo índice K, embora possua potencial para desencadear ventos fortes. Isso ocorre porque o índice K responde ao nível de subsaturação, conhecido como nível de “secura”, apenas no nível de 700 hPa. Para analisar melhor este aspecto, a Figura 4.15 exibe o perfil longitudinal da umidade relativa para o dia 09 de abril de 2022 às 20Z, na latitude mais próxima ao local de interesse (Navio Sonda NS-44).

Nota-se, a partir da Figura 4.15, que existe uma camada seca (com grande nível de subsaturação) acima do nível de 700 hPa (que alcança valores de 10 % de umidade relativa), se estendendo até os altos níveis (300 hPa) aproximadamente uma hora antes da ocorrência da *squall*. Esta camada seca em médios e altos níveis é um fator importante para gerar ventos

convectivos, haja vista que, quanto mais subsaturado o ar em uma camada específica, maior será a evaporação dos hidrometeoros e das gotículas de água que compõem as nuvens, e mais intensas serão as correntes descendentes.

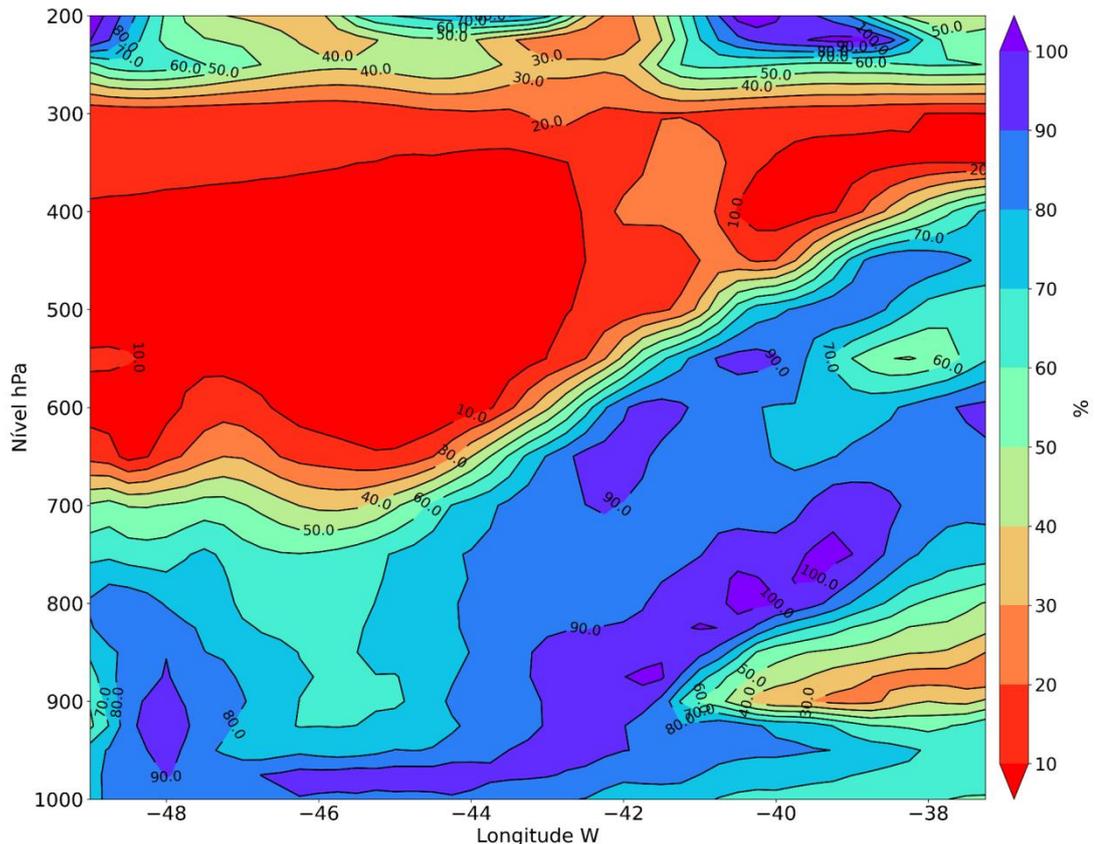


Figura 4.15 - Perfil Longitudinal de Umidade Relativa (%) para o dia 09 de abril de 2022 as 20Z, latitude 24,75°S.

Não obstante, a umidade relativa não é adequada para medir o suprimento de vapor d'água em uma determinada parcela de ar, sendo mais apropriado o uso de um perfil de umidade específica. Esse perfil fornece um indicativo da instabilidade convectiva e permite avaliar a estratificação de umidade no cenário em questão.

Para complementar a análise, a Figura 4.16 apresenta um corte vertical latitudinal para a umidade específica, que confirma a presença de uma camada seca em médios níveis, durante o período analisado no caso NS-44. Com os valores de umidade específica acima de 1,5 g/kg não alcançando 500 hPa a oeste da longitude de interesse (042,70811°W). A presença de uma

camada de ar seco em médios níveis sobre uma camada de ar úmido em baixos níveis, resultou em um intenso gradiente vertical de umidade específica (isolinhas próximas). Sabendo-se que as atmosferas mais instáveis convectivamente são, em geral, aquelas em que há maior gradiente vertical de umidade específica.

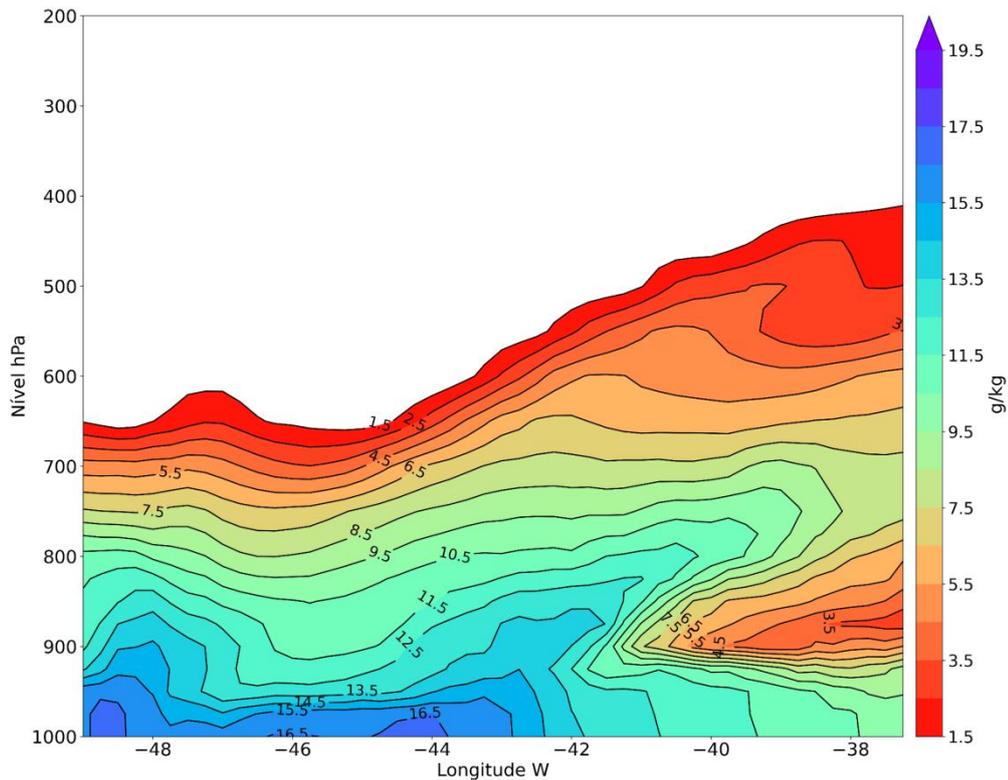


Figura 4.16 - Perfil Longitudinal de Umidade Específica (g/kg) para o dia 09 de abril de 2022 as 20Z, latitude 24,75°S.

Para o índice KO (Figura 4.17-a), observa-se valores inferiores a -11°C em torno do local do evento, abrangendo uma área significativa. Esses valores mais baixos indicam uma situação de instabilidade convectiva na região de estudo, tornando-a favorável à geração de tempestades. A sensibilidade do índice KO à umidade em baixos níveis justifica a presença de valores expressivos desse índice em grande parte da região de interesse.

No que se refere ao índice SHEAR (Figura 4.17-b), nota-se uma faixa de valores consideravelmente altos, entre 30 e 32 m/s, sobre a área do evento e cobrindo uma ampla extensão, evidenciando que o ambiente do caso de *squall* estudado possui cisalhamento vertical

expressivo, uma constatação que também foi observada no estudo conduzido por Berkes *et al.* (2012). Os autores, ao investigarem a relação entre a ocorrência de *squalls*, na África Equatorial Ocidental, mais precisamente na Bacia do Congo, e os índices clássicos de instabilidade, identificaram uma maior probabilidade de ocorrência de *squalls* em situações com elevados valores de CAPE e SHEAR.

Ademais, Pereira (2015) também encontrou valores muito significativos para o índice KO e o cisalhamento vertical entre a baixa e a média troposfera em casos de ventos intensos ocorridos nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. Tais índices foram considerados eficazes na distinção de casos com e sem vento forte, o que corrobora os resultados obtidos e ressalta a importância dos índices KO e SHEAR como fatores potenciais para a ocorrência de ventos convectivos intensos.

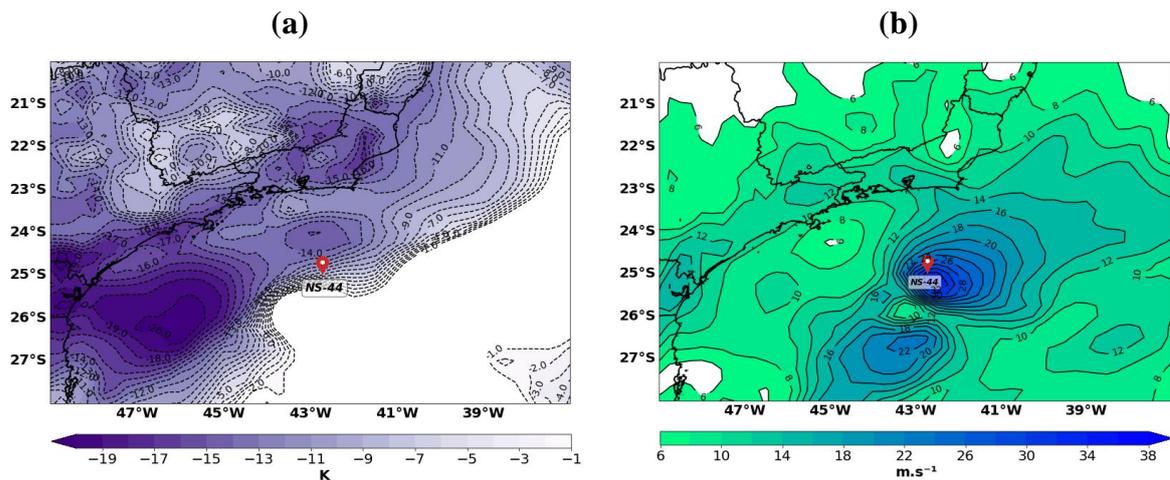


Figura 4.17 - (a) Índice KO (K) abaixo de -1K sombreado em tons de roxo e linhas em preto e (b) Índice SHEAR acima de 6 m.s^{-1} sombreado em tons de verde e azul e linhas em preto (m.s^{-1}), para o dia 09/04/2022 às 20Z. O ponto em vermelho indica o local de ocorrência da *squall*.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

O presente estudo foi conduzido com o objetivo de investigar eventos de *squall* nas Bacias de Campos e Santos, visando uma melhor compreensão destes fenômenos e a ampliação do conhecimento sobre as suas características. A crescente atividade de exploração de petróleo e gás nessas regiões desempenhou um papel fundamental na motivação deste estudo, haja vista que as *squalls* representam uma ameaça às operações em plataformas de petróleo *offshore* e à navegação.

A metodologia adotada incluiu a análise de séries temporais de velocidade e direção do vento coletadas por duas plataformas e um navio-sonda. Foram investigados parâmetros como intensidade do vento, mudanças na direção do vento, duração, tempo de subida, tempo de descida e outras características pertinentes. Esse processo permitiu a identificação de 16 eventos de *squall* na Bacia de Campos ao longo de um período médio de 2,5 anos. Adicionalmente, foi selecionado 1 (um) caso recente de *squall* ocorrido na Bacia de Santos para um estudo de caso particular (análise específica), totalizando 17 casos de *squall* com valores médios observados de 14 m/s para a velocidade máxima, 10 m/s para variação do vento e uma média de taxa de variação da intensidade do vento de $0,9 \text{ m.s}^{-1}/\text{min}$.

De modo geral, as *squalls* observadas apresentaram tempos de subida curtos, com uma média de 14,6 minutos e uma duração média de 1 hora. Entretanto, existem casos, como os tipos contínuo e escada, com persistência de ventos fortes, que podem exceder 2 horas de duração e possuem uma queda gradual da velocidade do vento.

Observou-se também que as *squalls* podem não vir acompanhadas por mudanças na direção do vento. Quando ocorrem, as mudanças mais significativas tendem a ocorrer simultaneamente com a variação da velocidade do vento e abrangem um ângulo de até 180° . Mais de 85% dos eventos que exibiram as maiores variações de velocidade do vento, estiveram associados à variações da direção antes e durante os eventos de *squall*, com valores de direção superiores a 45° .

Além disso, a análise dos casos estudados indicou que as *squalls* podem ocorrer em todas as direções, sendo as direções NE e E as mais comuns. Contudo, é importante salientar que a afirmação de uma predominância no quadrante leste não pode ser definitivamente sustentada, devido à amostra pequena de eventos analisados.

Ao classificar as séries de dados de *squalls* com base em mudanças na velocidade do vento e na aparência visual, identificou-se pelo menos um evento de *squall* para cada um dos

seis tipos de modelos encontrados no mar ao largo do Japão, confirmando a presença desses tipos de eventos também na área de estudo abordada neste trabalho.

A classificação predominante entre os casos de *squalls* foi as do tipo pico isolado, com uma representatividade de 41,2% (7 eventos), sendo aqueles que possuem predominantemente os tempos de subida muito curtos, taxas de variação da velocidade mais elevadas, os menores tempos de descida e grandes variações na direção do vento que os demais tipos.

Posteriormente, a análise do estudo de caso de *squall* ocorrido em 09 de abril de 2022, indicou que o incidente envolvendo a unidade NS-44 ocorreu, devido a um aumento repentino na velocidade do vento a 10 metros da superfície do mar no local de aproximadamente 16,2 m/s em um intervalo de seis minutos, acompanhada de uma variação da direção do vento superior a 90°.

Em escala sinótica, os resultados indicaram a presença de grande conteúdo de umidade em baixos níveis e forte divergência em altos níveis na região de interesse, o que contribuiu para o movimento ascendente, favorecendo o desenvolvimento da nebulosidade e o abaixamento da pressão na região. Além disso, o posicionamento do Jato de Altos Níveis e a presença de anomalia positiva de TSM na região de interesse auxiliaram na manutenção da baixa pressão em superfície. Em suma, um ambiente de intensa forçante termodinâmica em superfície e suporte dinâmico em altos níveis favoreceram a propagação e desenvolvimento do sistema convectivo em superfície e contribuíram para a intensificação do evento de *squall*.

Considerando a análise dos índices de instabilidade, os resultados apontaram para a existência de ar seco entre níveis médios e altos, bem como um intenso gradiente vertical de umidade específica, ambos fatores foram importantes para a geração de *squall*. Os índices K e TT, quando usados em conjunto, apresentaram uma representação sólida do ambiente precursor, indicando um potencial para ocorrência de tempestades. No entanto, o índice CAPE, embora essencial para tempestades severas, não forneceu resultados satisfatórios para o evento estudado.

Vale ressaltar o desempenho notável dos índices KO e SHEAR, que demonstraram valores altamente significativos nas proximidades do local de ocorrência do evento de *squall*, destacando-se como respostas eficazes a esse cenário. Mostrando-se eficientes como indicadores atmosféricos para a ocorrência de *squalls*, o que potencialmente os torna ferramentas valiosas para futuras investigações.

Destaca-se que a escassez de dados meteorológicos de alta resolução temporal no oceano é uma limitação crítica que afeta a compreensão e a previsão de eventos de *squalls*. Essa falta de dados pode dificultar a realização de análises precisas e a implementação de medidas de segurança eficazes em ambientes marítimos.

Portanto, uma análise mais detalhada das *squalls*, com a quantificação de parâmetros relevantes, como variações na direção e velocidade do vento e a elaboração de análises diagnósticas, como a apresentada neste estudo, configura-se como uma contribuição significativa no desenvolvimento de projetos *offshore*, além de desempenhar um papel fundamental na garantia da segurança em várias operações marítimas. Todavia, são necessários estudos adicionais para consolidar a aplicabilidade dessa metodologia.

Por fim, vale destacar que este estudo desempenha um papel pioneiro ao abordar um tema de pesquisa até então não explorado no Brasil, que são os eventos de *squalls*. Adicionalmente, busca alertar os profissionais na linha de frente de operações marítimas e pesquisadores sobre os potenciais impactos desses fenômenos em suas atividades e destacar sua ocorrência na região das Bacias de Campos e Santos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Em síntese as sugestões para trabalhos futuros são:

- Elaborar um modelo matemático simplificado de *squall* para uso como condição de projeto nas unidades marítimas *offshore* - um modelo matemático viabiliza o acoplamento com a dinâmica do navio como parâmetro de entrada para avaliar movimentos extremos na embarcação, assim como permite que se faça uma extrapolação para um *squall* com período de retorno de 100 anos, o que é essencial para análise de extremos. Contudo, a construção desse modelo matemático requer uma quantidade significativa de dados de eventos de *squall*, a fim de garantir sua representatividade em relação aos fenômenos reais.
- Comparar os índices atmosféricos (CAPE, K, TT, KO e SHEAR) calculados a partir de informações da reanálise ERA5 com outros obtidos a partir de outra fonte de dados (por exemplo CFSv2 - *Climate Forecast System Version 2*);
- Realizar a classificação das *squalls* de acordo com Brown *et al.* (2016) e Lu e Osaki (2015), categorizando as *squalls* quanto ao seu tempo de crescimento e duração e quanto ao tipo de fenômeno associado;

- Classificar os sistemas atmosféricos que contribuíram para a ocorrência dos eventos de *squalls* desta pesquisa, com a suposição de que as *squalls* podem ter características diferentes de acordo com a natureza dos sistemas meteorológicos que as originam;

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, J.; ORSERO, P.; QUINIOU-RAMUS, V.; FRANÇOIS, M.; MOYSAN, A. G.; I'HOSTIS, D; LEDOUX, A. Squall response based design of floating units in West Africa. *In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. p. 233-242, 2011.

ANDERSSON, T.; ANDERSSON, M.; JACOBSSON, C.; NILSSON, S. Thermodynamic indexes for forecasting thunderstorms in southern Sweden. **Meteorological Magazine**, v. 118, n. 1404, p. 141-146, 1989.

AZAD, A. K.; ALAM, M. M. Determination of wind gust factor at windy areas of Bangladesh. *In: 13th Asian Congress of Fluid Mechanics, IUT, Dhaka, Bangladesh*. p. 521-524, 2010.

BERKES, F.; KNIPPERTZ, P.; PARKER, D. J.; JEANS, G.; QUINIOU-RAMUS, V. Convective Squalls over the Eastern Equatorial Atlantic. **Weather and Forecasting**, 27, p.770–783, 2012.

BLUESTEIN, H. B. **Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and Theory of Weather Systems**. Oxford University Press, New York, EUA, 594 p, 1993.

BROWN, A.; GORTER, W.; PAALVAST, M.; KYMMELL, J. Design approach for CALM buoy moored vessel in squall conditions. *In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2016.

BROWN, A.; GORTER, W.; VANDERSCHUREN, L.; TROMANS, P.; JONATHAN, P.; VERLAAN, P. Design approach for Turret Moored vessels in highly variable Squall conditions. *In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2017.

BROWNING, K. A; LUDLAM, F. H. Airflow in Convective Storms. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 88, p. 117-135, 1962.

CAO, Y.; YU, X.; XIANG, G.; RUAN, W.; LU, P. On critical parameters of squall associated with the mooring design of a turret-moored FPSO. **Ships and Offshore Structures**, v. 13, n. sup1, p. 182-190, 2018.

- CHAPPELL, C. F. Quasi-Stationary Convective Events, In: Ray, P.S. (Ed). **Mesoscale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 1986. p. 289-310.
- CHAVES, R. R. Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul: análise observacional. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 5-20, 2011.
- CHIN, T. M.; VAZQUEZ-CUERVO, J.; ARMSTRONG, E. M. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. **Remote sensing of environment**, v. 200, p. 154-169, 2017.
- DAS, M. K; CHOWDHURY, M. A. M.; DAS, S.; DEBSARMA, S. K.; KARMAKAR, S. Assimilation of Doppler weather radar data and their impacts on the simulation of squall events during pre-monsoon season. **Natural Hazards**, v. 77, p. 901-931, 2015.
- DNV. Environmental Conditions And Environmental Loads, Recommended Practice DNV-RP-C205, Det Norske Veritas, 2007.
- DNV. Offshore Standard DNV-OS-E301: Position Mooring, Det Norske Veritas, 2008.
- DUGGAL, A.; HEYL, C.; IZADPARAST, A. H.; MINNEBO, J. Response of FPSO systems to squalls. In: **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 44359, p. 913-920, 2011.
- EMANUEL, K. **Atmospheric Convection**. Oxford University Press, 580p., 1994.
- EVANS, J. S.; DOSWELL, C. A. Examination of derecho environments using proximity soundings. **Weather and Forecasting**, v. 16, p. 329-342, 2001.
- FRANCO, R. M. **Análise das características atmosféricas associadas a eventos de “downbursts”: um estudo de caso para o Rio de Janeiro**. 2017. 57 p. Monografia (Bacharel em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- FRANCO, R. M.; MENEZES, W. F.; VASCONCELLOS, F. C. Análise sinótica e de mesoescala de ventos intensos com impacto destrutivo em linhas de transmissão de energia elétrica no Paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 07, p. 3177-3194, 2020.
- FUJITA, T. T. The downburst, report of Projects NIMROD and JAWS. **University of Chicago**, 1985.

G1 GLOBO. **China confirma 431 mortes em naufrágio de cruzeiro.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/2015/06/china-confirma-431-mortes-em-naufragio-de-cruzeiro.html>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

GEORGE, J. J. **Weather Forecasting for Aeronautics.** Academic Press, 673p., 1960.

GRAMCIANINOV, C. B.; CAMPOS, R. M.; GUEDES SOARES, C.; CAMARGO, R. Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean. **Ocean Engineering**, v. 213, p. 107745, out. 2020. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107745

GRAY, W. M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 10, p. 669-700, 1968.

HALLAK, R., PEREIRA FILHO, A. J. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.2, p. 173-206, 2012.

HANE, C. E. Extratropical squall lines and rainbands. In: **Mesoscale Meteorology and Forecasting.** American Meteorological Society, Boston, p. 359-389, 1986.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P., *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1–51, 2020. DOI:10.1002/qj.3803.

HENRY, W. **The Skew-T, Log P Diagram.** National Weather Service Training Center, EUA, 68p, 1987.

HUANG, B.; LIU, C.; BANZON, V.; FREEMAN, E.; GRAHAM, G.; HANKINS, B.; SMITH, T.; ZHANG, H. M. Improvements of the daily optimum interpolation sea surface temperature (DOISST) version 2.1. **Journal of Climate**, v. 34, n. 8, p. 2923-2939, 2021.

JEANS, G.; COOPER, C.; YETSKO, C. New Squall Wind Criteria for the Gulf of Mexico. In: **Offshore Technology Conference**, 2016.

JEANS, G.; COPPER, C.; YETSKO, C.; BRYAN, G. Squall characterization in the Gulf of Mexico. In: **Offshore Technology Conference**, 2014.

JEANS, G.; REDFORD, S.; BELLAMY, I.; MUNDY, R. The WAG squall measurement system. In: **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v.48210, p. 817-824, 2008.

KONGA, S. G. **The Analysis of Shuttle-Tanker and floating storage offloading during Berthing operations at offshore Nigeria, in response to soliton and squall events.** 2015. 54 p. Dissertação (Master Thesis of Science In Physical Oceanography and Applications) – Faculty of Science and Technology, University of Abomey-Calavi, Cotonou. 2015.

LEGERSTEE, F.; FRANÇOIS, M. MORANDINI, C.; LE-GUENNEC, S. Squall: Nightmare for designers of deepwater West African mooring systems. *In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.* p. 171-176, 2006.

LU, Y.; OZAKI, M.. Squall in Mid-latitude Regions and its Effect on Offshore Operations. *In: The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference.* OnePetro, 2015.

LU, Y.; OSAKI, M.; WADA, R. Squalls in sea off coast of Japan and their effects on marine operations based on weather observatory data at remote islands. **Journal of Marine Science and Technology.** v.23, ed.1, p.104-121, 2017.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J.; TUSA, D. **The atmosphere.** Prentice Hall, 1995.

MARIANI, A.; ELLIOTT, G.; WAKE, G.; WHELAN, J.; JEANS, G. A Novel Approach to the Development of Squall Database for Mooring Response Based Analysis. *In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.* American Society of Mechanical Engineers, 2017.

MELO, A. C. C.; PALMEIRA, A. C. P. A.; MENEZES, W. F. Identificação e caracterização de Baixas Polares sobre a Península Antártica e mares adjacentes. **Sistemas & Gestão,** v. 16, n. 3, p. 278-285, 2022. DOI:10.20985/1980-5160.2021.v16n3.1721.

MENEZES, W. F., PAIVA, L. M. S., SILVA, M. G. A. J. Estudo do Ambiente Favoráveis à Propagação de Ambientes Convectivos de Mesoescala sobre o Município do Rio de Janeiro. *In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia; Anais [...].* 2000; Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Meteorologia. v. 1. p. 1635 - 1645, 2000.

MILLER, R. C. **Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central.** Tech. Report 200, Air Weather Service, United States Air Force, 190 p., 1972.

MINNEBO, J.; IZADPARAST, A. H.; DUGGAL, A.; HUIJSMANS, R. H. M. Response-based analysis of FPSO systems for squall loadings. *In: International Conference on Offshore*

Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, p. 505-512, 2012.

MOREIRA, J. L. P.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M. A. P. Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 531-549, 2007.

NACIRI, M.; CHITRAPU, M.. Turret-Moored FPSO Yaw Motions in a Squall-Prone Region. *In: Offshore Technology Conference*. OnePetro, 2019.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de Tempestades Severas Utilizando-se Parâmetros Convectivos e Modelos de Mesoescala: Uma Estratégia Operacional Adotável no Brasil?. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol.20, No. 1, pp.121-140, 2005.

OBERLIES, R. R.; BHATTACHARJEE, S.; HE, H. Guidance for Performing Time-Domain Mooring Analysis of Floating Systems in Squall Environments. *In: Offshore Technology Conference*, 2017.

OBERLIES, R.; GUHA, A.; SLOCUM, S. Mooring Analysis of a Turret Moored FPSO in a Squall Environment. *In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015. p. V001T01A058.

PEREIRA, R. F. **Um Estudo de Características Físicas Associadas a Ventos Convectivos Intensos nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil Usando Modelagem Numérica**. 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

RANGEL, H. D.; MARTINS, F. A. L.; ESTEVES, F. R.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Campos: Carta Cronoestratigráfica. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 203-219, 1994.

RIBEIRO, R. E. P. **Características da circulação e da estabilidade atmosférica no estado do Rio Grande do Norte: Aplicação da análise multivariada**. 2017. 112 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2017.

RODRIGUES, K. S.; DO CARMO, L. F. R.; PALMEIRA, A. C. P. A.; ANDRIONI, M. BRAMS model performance for significant event involving Brazilian platform ship. **Natural Hazards**, v. 110, n. 3, p. 2277–2302, 2022. DOI: 10.1007/s11069-021-05037-5.

RODRIGUES, K. S.; AMARAL, I. C. F.; CAIAFA, M. V.; PALMEIRA, A. C. P. A. Proposta de Escala de Vorticidade para Sistemas Convectivos na Região das Bacias de Campos e Santos. *In: XIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite (OMARSAT)*. 2019, Arraial do Cabo. Anais de Resumos [...]. Arraial do Cabo: [s.n.], 2019.

SALES, F. H.; PEREIRA FILHO, A. J. Study of a Long-Lived Symmetric Squall Line in Southeast Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 421-436, 2005.

SANTALA, M. J.; CALVERLEY, M.; TAWS, S.; GRANT, H.; WATSON, A.; JEANS, G. Squall Wind Elevation/Gust Factors and Squall Coherence. **Offshore Technology Conference**, Houston, May 2014. DOI: 10.4043/25249-MS.

SILVA DIAS, M. A. F. Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas. **Universidade de São Paulo, SP**, 2000.

SILVA, F. P. **Chuvas severas no Rio de Janeiro: Avaliação de indicadores dos processos físicos associados**. 2014. 155 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.

SINCLAIR, M. R. An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p. 2239-2256, out. 1994. DOI: 10.1175/1520-0493(1994)122%3C2239:AOCFT%3E2.0.CO;2.

SOUZA, L. S.; SGARBI, G. N. C. Bacia de Santos no Brasil: geologia, exploração e produção de petróleo e gás natural. **Boletín de Geología**, v. 41, n. 1, p.175-195, 2019. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019009.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 449p., 2000.

WEISMAN, M.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically-simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 504-520, 1982.

WEISMAN, M., L.; KLEMP, J. B. Characteristics of isolated convective storms. In: RAY, P.S. (Org.). **Mesoscale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, p. 331-358, 1986.

WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 2008. World Meteorological Organization Rep. WMO-08 (7th ed.). Disponível em:

<http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-474-WMO-Guide.pdf>.

Acesso em: 11 fev. 2022.

WMO. Manual on codes-international codes, volume I. 3, annex II to the WMO technical regulations: part D - Representations derived from data models. 2019.

WMO. Supplement to the WMO publication No. 122.RP.50 abridged final report of the third session of the Commission for Synoptic Meteorology. Washington: World Meteorological Organization, 228 pp, 1962.