

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Instituto de Oceanografia

Programa de Pós-Graduação em Oceanologia

**INFLUÊNCIA DOS FLUXOS DE CALOR OCEÂNICOS
NA FORMAÇÃO DOS CICLONES EXTRATROPICAIS
NO ATLÂNTICO SUL**

CAMILA FERREIRA RUSSO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação
em Oceanologia, como parte
dos requisitos para a obtenção
do Título de Mestre.

Orientador: *Prof. Dr.* FABRÍCIO SANGUINETTI CRUZ DE OLIVEIRA
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Coorientadora: *Dra.* CAROLINA BARNEZ GRAMCIANINOV
Institute for Coastal Systems Analysis and Modeling - Helmholtz-Zentrum Hereon, Alemanha.

Rio Grande, RS, Brasil

Novembro 2024

INFLUÊNCIA DOS FLUXOS DE CALOR OCEÂNICOS NA FORMAÇÃO DOS CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanologia,
como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre.

por

CAMILA FERREIRA RUSSO

Rio Grande, RS, Brasil

Novembro 2024

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor.

RUSO, CAMILA

Influência dos Fluxos de Calor Oceânicos na Formação dos Ciclones Extratropicais no Atlântico Sul/ Camila Ferreira Russo. – Rio Grande: FURG, 2024.

Número de páginas p. 100

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande. Mestrado em Oceanologia. Área de Concentração: Física dos Oceanos e Clima.

1. Interação oceano-atmosfera. 2. Ciclogênese. 3. Atlântico Sul.



ATA ESPECIAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 12/2024

Às treze horas e trinta minutos do dia vinte e dois de novembro do ano dois mil e vinte e quatro, por Video conferencia sala: <https://conferenciaweb.rnp.br/sala/fabricio-sanguinetti-cruz-de-oliveira>, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** intitulada: **“INFLUÊNCIA DOS FLUXOS DE CALOR OCEÂNICOS NA FORMAÇÃO DOS CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL”**, da Acad. **Camila Ferreira Russo**. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Fabricio Sanguinetti Cruz de Oliveira - Orientador – (IO/FURG); Dra. Carolina Barnez Gramcianinov – Coorientadora – (HELMHOLTZ-ZENTRUM HEREON/ALEMANHA); Prof. Dr. Mario Francisco Leal de Quadro - (IFSC); Prof. Dr. Jeferson P. Machado – (IO/FURG) e Prof. Dr. Ricardo de Camargo – (USP). Dando início à reunião, a Coordenadora do PPGO, Profa. Dra. Grasiela Lopes Leães Pinho, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que a candidata teria um tempo de 45 a 60 min para explanação do tema, e cada membro da Comissão Examinadora, um tempo máximo de 30 min para perguntas. A seguir, passou à palavra a candidata que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação, a Comissão Examinadora reuniu-se em reservado para discussão do conceito a ser atribuído a candidata. Foi estabelecido que as sugestões de todos os membros da Comissão Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pela Orientador/Candidata para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente, a Comissão Examinadora considerou a candidata APROVADA, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ATA, por mim, Clabisnei Moura de Melo – Secretário PPGO, que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pela Candidata e pela Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanologia.

Documento assinado digitalmente
gov.br FABRICIO SANGUINETTI CRUZ DE OLIVEIRA
Data: 23/11/2024 17:21:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Fabricio Sanguinetti Cruz de Oliveira
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br CAROLINA BARNEZ GRAMCIANINOV
Data: 26/11/2024 10:49:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Carolina Barnez Gramcianinov

Documento assinado digitalmente
gov.br JEFERSON PRIETSCH MACHADO
Data: 26/11/2024 00:53:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jeferson P. Machado

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 26/11/2024 12:59:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mario Francisco Leal Quadro

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO DE CAMARGO
Data: 26/11/2024 16:12:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo de Camargo

Documento assinado digitalmente
gov.br CAMILA FERREIRA RUSSO
Data: 26/11/2024 16:33:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Acad. Camila Ferreira Russo

Documento assinado digitalmente
gov.br GRASIELA LOPES LEAES PINHO
Data: 14/11/2024 09:10:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª Grasiela Lopes Leães Pinho
Coordenadora PPGO

Índice

Agradecimentos.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xiv
Resumo	xv
Abstract.....	xvii
Capítulo I: Introdução	19
Capítulo II: Objetivos	30
2.1 Objetivo Geral.....	30
2.2 Objetivos Específicos.....	30
Capítulo III: Material e Métodos.....	31
3.1 Conjunto de Dados	31
3.2 Algoritmo TRACK	33
3.3 Seleção dos Casos	34
3.4 Classificação do Ciclo de Vida dos Ciclones e Análise de Parâmetros	37
Capítulo IV: Artigo Científico: Impacts of ocean heat and moisture fluxes on extratropical cyclone development in the South Atlantic	39
4.1 Introduction	41
4.2 Data and Methodology.....	45
4.2.1 Datasets	45
4.2.2 TRACK algorithm	46
4.2.3 Case selection.....	47
4.2.4 Bomb Cyclone identification	49

4.2.5 Cyclone Lifecycle Classification and Parameter Analysis	50
4.3 Results.....	51
3.1 Temporal and Spatial Variability of Cyclones	51
4.3.2 Influence of Oceanic Fluxes, Sea Surface Temperature and Moisture Fluxes.....	54
4.4 Discussion	84
4.5 Conclusion	88
Capítulo V: Síntese da Discussão e Conclusão	91
Capítulo VI: Referências Bibliográficas	95

Agradecimentos

Chegar até aqui foi uma jornada intensa, repleta de desafios, aprendizados e crescimento. Olhar para trás e ver tudo o que foi construído ao longo dessa caminhada me enche de gratidão, pois sei que não percorri esse caminho sozinha. Muitas pessoas foram fundamentais para que esta dissertação se tornasse realidade, e a elas dedico estas palavras.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor, apoio e incentivo incondicional. Vocês foram minha base, meu porto seguro nos momentos difíceis e minha maior inspiração para continuar. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei, por comemorarem minhas conquistas e por me lembrarem do meu valor.

Aos meus orientadores, Fabrício e Carolina, expresso minha imensa gratidão pela paciência, dedicação e ensinamentos ao longo desses anos. Obrigada por compartilhar seu conhecimento, por me desafiar a pensar criticamente e por estar sempre disponível para discutir ideias e caminhos para este trabalho. Sua orientação foi essencial para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos membros da banca, Ricardo de Camargo, Jeferson P. Machado e Mario Francisco Leal de Quadro, agradeço imensamente por aceitarem participar deste momento tão importante. Suas contribuições e sugestões enriqueceram este trabalho e me fizeram enxergar novas perspectivas.

Aos meus colegas de laboratório e do programa de pós-graduação, meu muito obrigada pelo companheirismo, pelas discussões científicas, pela troca de experiências e, principalmente, pelo apoio mútuo ao longo dessa jornada. Os

momentos de colaboração e amizade tornaram os desafios mais leves e a rotina acadêmica muito mais prazerosa. Em especial, agradeço aos membros do Laboratório de Oceanografia Dinâmica e por Satélites - LODS, pelo incentivo, pelas conversas que me fizeram seguir em frente e pelas risadas que aliviaram o peso do caminho.

Aos professores que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica, deixo meu reconhecimento e gratidão. Cada aula, conselho e orientação foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço também às agências de fomento, CAPES, pelo suporte financeiro que tornou possível a realização deste estudo.

Aos meus amigos de dentro e fora da academia (Flávia, Isabela, Kelem, Roberta, Ítala, Bárbara, Lela, Nat, Luísa, Aninha, Sophia, Joana), que muitas vezes foram meu refúgio e lembraram-me da importância de equilibrar a vida acadêmica com momentos de descanso e lazer, meu muito obrigada. Vocês me ajudaram a manter a sanidade em meio às pressões e incertezas do mestrado.

E, claro, um agradecimento especial à minha fiel companheira de quatro patas, Nina. Nos dias mais cansativos, nos momentos de dúvida e nas madrugadas de estudo, sua presença foi um conforto imenso. Obrigada pelos olhares cheios de amor, pelas pausas obrigatórias para brincar e pelos momentos em que, sem dizer uma palavra, você soube exatamente como me acalmar. Ter você ao meu lado fez tudo ser mais leve.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada, meu sincero agradecimento.

Lista de Figuras

Figura 1. Processos atmosféricos e oceânicos que influenciam a formação, intensificação e enfraquecimento de ciclones extratropicais. À esquerda, o gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) afeta os fluxos de calor sensível e latente, assim como a umidade transferida do oceano para a atmosfera. Esses fluxos impactam a estabilidade atmosférica, levando à formação e intensificação do ciclone (à direita), representado pela área de baixa pressão marcada com "B". O enfraquecimento desses fluxos pode levar a dissipação dos ciclones extratropicais.....**23**

Figura 2. Modelos conceituais do ciclo de vida dos ciclones extratropicais no Hemisfério Sul: a) modelo de Bjerknes e Solberg (1922) e b) modelo de Shapiro e Keyser (1990). O painel superior de cada modelo mostra a altura geopotencial em 850 hPa e as frentes fria (azul), quente (vermelha) e oclusa (roxa). Já o painel inferior apresenta a temperatura potencial também em 850 hPa. Os estágios de vida representam intervalos de 6 a 24 horas. Fonte: Reboita [2017].....**25**

Figura 3. Interação entre a Corrente do Brasil, que transporta águas quentes para o sul, e a Corrente das Malvinas, que traz águas frias do Sul em direção ao norte, formando a Confluência Brasil-Malvinas. O mapa mostra a temperatura da superfície do mar (TSM) e vetores de velocidade, onde é possível identificar a influência dessas correntes, com as águas mais quentes ao norte associadas à Corrente do Brasil e as águas mais frias ao sul associadas à Corrente das Malvinas. Fonte: Matano et al., 2010.....**27**

Figura 4. Densidade de gênese para o domínio do Atlântico Sul (marcado em linha cinza tracejada) calculada para todo o período de 1979–2010. As quatro regiões de gênese estão marcadas em linha preta. A unidade de densidade é ciclone por 10^6 km² por mês. Fonte: Gramcianinov, 2019.....**28**

Figura 5. Regiões preferenciais de ciclogênese no oeste do Atlântico Sul entre 1979 e 2020 em (a) todas as estações, (b) verão (DJF) e (c) inverno (JJA). A unidade de densidade é o número de gênese por mês por 10^6 km². Fonte: Gramcianinov et al., 2022.....**29**

Figure 4.1. Tracks of the six selected extratropical cyclones, intensens and bombs, in the South Atlantic Ocean. I and B denote Intense and Bomb cyclone cases, respectively.....**52**

Figure 4.2. Time evolution of central surface pressure and vorticity for six selected cyclones is depicted, with red lines representing vorticity at 850 hPa (scaled by -1×10^{-5}), and the blue lines indicating the system's central surface pressure (hPa). The cyclone's life phase is separated as genesis (green), intensification (yellow), maturity (purple), and dissipation (gray). The plots correspond to the following cyclone cases: I1 (a), I2 (b), I3 (c), B1 (d), B2 (e), and B3 (f). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....**53**

Figure 4.3. Approximately 24h before cyclogenesis for the intense cases: I1- May 17 18:00; I2 - June 13 18:00; I3 - July 03 18:00. a, c, e) Latent heat flux in W/m². b, d, f) Sensible heat flux in W/m². The "X" symbol represents the position of cyclogenesis for visual reference of the cyclone location.....**57**

Figure 4.4. Extratropical cyclone case I1 at intensification on May 19 12:00 (a-e) and maturity on May 21 06:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat flux in W/m². e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.....**59**

Figure 4.5. Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone I1 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d) Specific humidity (kg/kg) The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....**61**

Figure 4.6. Extratropical cyclone case I2 at intensification on June 15 06:00 (a-e) and maturity on June 19 18:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat flux in W/m². e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.....**63**

Figure 4.7. Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone I2 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d) Specific humidity (kg/kg) The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....**65**

Figure 4.8. Extratropical cyclone case I3 at intensification on July 5 06:00 (a-e) and maturity on July 7 00:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat flux in W/m². e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.....**67**

Figure 4.9. Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone I3 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d) Specific humidity (kg/kg) The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....**69**

Figure 4.10. Approximately 24h before cyclogenesis for the bomb cases: B1 - September 11 12:00; B2 - March 17 00:00; B3 - January 01 06:00. a, c, e) Latent heat flux in W/m². b, d, f) Sensible heat flux in W/m². The "X" symbol represents the position of cyclogenesis for visual reference of the cyclone location.....**73**

Figure 4.11. Extratropical cyclone case B1 at intensification on September 13 00:00 (a-e) and maturity on September 14 06:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible

heat flux in W/m^2 . e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day . The magenta dot represents the center of the cyclone.....74

Figure 4.12. Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone B1 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST ($^\circ C$). b) Sensible heat flux (W/m^2). c) Latent heat flux (W/m^2). d) Specific humidity (kg/kg) The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....76

Figure 4.13. Extratropical cyclone case B2 at intensification on March 18 18:00 (a-e) and maturity on March 19 12:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in $^\circ C$ and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m^2 . d, i) Sensible heat flux in W/m^2 . e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day . The magenta dot represents the center of the cyclone.....78

Figure 4.14. Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone B2 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST ($^\circ C$). b) Sensible heat flux (W/m^2). c) Latent heat flux (W/m^2). d) Specific humidity (kg/kg) The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....79

Figure 4.15. Extratropical cyclone case B3 at intensification on January 02 18:00 (a-e) and maturity on January 04 00:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in $^\circ C$ and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m^2 . d, i) Sensible heat flux in W/m^2 . e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day . The magenta dot represents the center of the cyclone.....81

Figure 4.16. Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone B3 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST ($^\circ C$). b) Sensible heat flux (W/m^2). c) Latent heat flux (W/m^2). d) Specific humidity (kg/kg) The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.....82

Figure 4.17. Extratropical cyclone cases B1(a-b), B2(c-d) and B3(e-f) at dissipation phase. a, c, e) Latent heat flux in W/m^2 . b, d, f) Sensible heat flux in W/m^2 . The magenta dot represents the center of the cyclone.....**83**

Lista de Tabelas

Tabela 1. Variáveis oceânicas e atmosféricas do CFSR/CFSv2 utilizadas.....**33**

Tabela 2. Casos de ciclones com dados meteorológicos associados, incluindo a identificação dos casos, a duração de seu ciclo de vida, datas e horários de início e término, pressão central mínima em hPa e a velocidade máxima do vento em m/s durante cada evento.....**35**

Tabela 4.1. The cyclone cases with associated meteorological data, including case identification, lifespan duration, start and end dates with times, minimum central pressure (in hPa), and the maximum wind speed (in m/s) recorded during each event.**48**

Resumo

Ciclones extratropicais são sistemas meteorológicos que influenciam significativamente o clima da América do Sul. Esses ciclones se formam e se intensificam por meio de interações complexas entre massas de ar contrastantes, influenciando e sendo influenciados por variáveis da interface oceano-atmosfera. Quando a pressão central de um ciclone cai mais de 24 hPa em um intervalo de 24 horas, ele é categorizado como explosivo ou bomba, indicando uma intensificação rápida. O objetivo do trabalho é investigar o papel dos fluxos de calor do oceano na formação e intensificação de ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Para isso, uma análise das trocas de calor latente e sensível e de umidade entre atmosfera e oceano durante o ciclo de vida dos ciclones foi realizada em seis estudos de caso, sendo três casos de ciclones intensos e três casos explosivos na costa da América do Sul. Utilizamos uma base de dados de ciclones extratropicais no Atlântico para a identificação de parâmetros ao longo do ciclo de vida dos casos selecionados. O conjunto de reanálises CFSR/CFSv2 do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) foi usado para analisar parâmetros como os fluxos de calor latente e sensível, umidade específica, componentes zonal e meridional do vento (u e v) e temperatura da superfície do mar (TSM). Essa reanálise possui uma resolução de grade de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ em intervalos de 6 horas e utiliza um modelo acoplado atmosfera-oceano. O fluxo de calor latente na superfície associado à TSM desempenhou um papel fundamental na intensificação do ciclone desenvolvendo baroclínico ao impulsionar a transferência de umidade do oceano para a atmosfera, alimentando a convecção, a formação de nuvens e a

liberação de calor latente. Enquanto os fluxos de calor sensível tiveram um papel secundário que pode ser associado à taxa de aprofundamento. Também foi identificada uma forte influência da umidade específica no setor quente dos seis casos. À medida que os ciclones se dissipam há um enfraquecimento do sistema, com uma diminuição nos fluxos de calor.

Palavras-Chave: Interação oceano-atmosfera; Ciclogênese; Atlântico Sul.

Abstract

Extratropical cyclones are meteorological systems that significantly influence South America's climate. These cyclones form and intensify through complex interactions between contrasting air masses, influencing and being influenced by variables at the ocean-atmosphere interface. When the central pressure of a cyclone drops more than 24 hPa within 24 hours, it is categorized as explosive or a bomb, indicating rapid intensification. The study aims to investigate the role of ocean heat fluxes in the formation and intensification of extratropical cyclones on the South Atlantic. For this purpose, an analysis of latent and sensible heat and humidity exchanges between the atmosphere and ocean during the life cycle of cyclones was conducted in six case studies, including three intense cyclone cases and three explosive cases off the coast of South America. We utilized a database of extratropical cyclones in the Atlantic to identify parameters throughout the life cycle of the selected cases. The CFSR/CFSv2 reanalysis dataset from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) was used to analyze parameters such as latent and sensible heat fluxes, specific humidity, zonal and meridional wind components (u and v), and sea surface temperature (SST). This reanalysis has a grid resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ at 6-hour intervals and utilizes a coupled atmosphere-ocean model. Latent heat flux at the surface associated with SST played a fundamental role in baroclinic development by driving the transfer of moisture from the ocean to the atmosphere, fueling convection, cloud formation, and the release of latent heat. While sensible heat fluxes had a secondary role that can be associated with deepening rate. A strong influence of specific humidity in the warm sector of all six cases was also

identified. As cyclones dissipate, there is a weakening of the system, with a decrease in heat fluxes.

Keywords: Ocean-atmosphere interaction; Cyclogenesis; South Atlantic.

Capítulo I: Introdução

Ciclones extratropicais, sistemas de baixa pressão atmosférica que se desenvolvem em latitudes médias, são fundamentais para a dinâmica climática global, influenciando significativamente os padrões meteorológicos regionais e globais [Peixoto & Oort, 1992]. A ocorrência de ciclones extratropicais impacta significativamente o clima e o tempo da América do Sul [Reboita et al., 2005]. Caracterizam-se por uma ampla área de baixa pressão central e ventos circulantes no sentido anti-horário no hemisfério norte e no sentido horário no hemisfério sul. Esses sistemas atmosféricos são conhecidos por gerar condições meteorológicas adversas, incluindo ventos fortes, precipitação intensa e variações abruptas de temperatura, afetando amplamente o ambiente e as atividades humanas. Suas consequências podem incluir tempestades severas, inundações costeiras, ressacas e perturbações na navegação marítima e em operações de plataformas de petróleo [e.g., Gramscianinov et al., 2023].

Além disso, os ciclones extratropicais desempenham um papel crucial no transporte de calor e umidade na atmosfera, contribuindo para os fluxos de energia térmica e vapor d'água em direção aos polos [Peixoto & Oort, 1992]. Essa redistribuição de calor e umidade influencia diretamente os padrões climáticos globais e regionais, afetando a circulação atmosférica e a formação de sistemas climáticos complexos, como frentes frias e tempestades [Peixoto & Oort, 1992].

Fluxos oceânicos de calor e umidade e gradientes de temperatura da superfície do mar (TSM) interferem na formação e intensificação de ciclones extratropicais. Estudos relacionam a densidade de ciclones à variabilidade dos fluxos de calor oceânico e gradiente de TSM [Piva et al., 2008; Sinclair, 1995; Gramscianinov et al., 2019]. Múltiplos fatores contribuem para o desenvolvimento de ciclones extratropicais, incluindo a influência de cavados em níveis superiores, o jato subtropical, o efeito a sotavento dos Andes e anomalias positivas de temperatura da superfície do mar [Gan & Rao, 1994; Hoskins & Hodges, 2005].

O desenvolvimento baroclínico, importante para o desenvolvimento dos ciclones extratropicais, ocorre quando há um gradiente significativo de temperatura entre massas de ar quente e frio, uma característica comum em regiões de latitudes médias. Esse contraste de temperatura cria instabilidade na atmosfera, essencial para a formação de ciclones. Em um ambiente baroclínico, a velocidade e a direção do vento mudam com a altura devido ao gradiente de temperatura, um fenômeno conhecido como vento térmico. À medida que o gradiente de temperatura se intensifica, o cisalhamento do vento na atmosfera também aumenta. Quando uma perturbação, como uma onda na corrente de jato, interage com a fronteira entre as massas de ar quente e frio, inicia-se a formação

de uma onda ciclônica. Essa onda cresce à medida que o contraste térmico entre as massas de ar alimenta a conversão de energia potencial (relacionada às diferenças de temperatura) em energia cinética, impulsionando a intensificação do ciclone [Holton & Hakim, 2013].

Os ciclones, então, se formam em ambientes baroclínicos, onde o gradiente de temperatura horizontal é acentuado, criando condições ideais para o desenvolvimento de instabilidade atmosférica. A formação desses ciclones, conhecida como ciclogênese, começa quando há um distúrbio no campo atmosférico, como uma onda no jato de altos níveis, que provoca a rotação das massas de ar [Lackmann, 2011]. Esse processo leva à criação de um sistema de baixa pressão, onde a interação entre o ar frio e o ar quente gera convecção, fundamental para alimentar o ciclone por meio da liberação de calor latente durante a condensação do vapor d'água.

O fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível são componentes essenciais no balanço energético da Terra e desempenham um papel crucial no desenvolvimento de fenômenos meteorológicos e no sistema climático global. O fluxo de calor latente refere-se à energia transferida entre a superfície terrestre e a atmosfera durante mudanças de fase da água, como evaporação e condensação, sem causar alterações de temperatura. Essa transferência de calor é especialmente significativa em regiões onde a evaporação é predominante, como nos oceanos e em áreas úmidas, e é uma fonte importante de energia para a formação de nuvens e tempestades, influenciando diretamente a dinâmica da atmosfera. Processos relacionados ao fluxo de calor latente são fundamentais para o transporte de vapor d'água, que, ao se condensar na atmosfera, libera calor, intensificando sistemas de baixa pressão e contribuindo

para o desenvolvimento de ciclones extratropicais e tropicais [Stull, 1988; Emanuel et al., 1994].

O fluxo de calor sensível, por sua vez, está associado à troca de calor entre a superfície e a atmosfera que resulta em variações de temperatura. Esse tipo de fluxo é governado pela diferença de temperatura entre a superfície e o ar, sendo mais intenso em áreas onde essa diferença é maior, como desertos e regiões com forte radiação solar. O fluxo de calor sensível tem um impacto direto na circulação atmosférica, influenciando a formação de ventos locais e a distribuição de temperatura na troposfera. A transferência de calor sensível é uma força motriz para a convecção atmosférica, que desempenha um papel crítico no transporte vertical de calor e na redistribuição de energia no sistema climático [Holton & Hakim, 2013].

A compreensão dos fluxos de calor latente e sensível é vital para o estudo de fenômenos climáticos e meteorológicos, pois eles afetam diretamente o balanço energético da Terra e a dinâmica atmosférica. Esses fluxos influenciam desde a formação de sistemas de alta e baixa pressão até a evolução de ciclones e tempestades, sendo componentes-chave na modelagem climática e na previsão meteorológica [Hartmann, 2015]. A análise desses processos permite uma melhor compreensão das interações entre a superfície e a atmosfera, contribuindo para previsões mais precisas e para a mitigação de impactos climáticos em diferentes regiões do planeta.

O desenvolvimento do ciclone é ainda mais apoiado pelos fluxos de calor da superfície relacionados a TSM, especialmente sobre correntes oceânicas quentes. À medida que a umidade é transferida do oceano para a atmosfera, ela

condensa e libera calor latente, aumentando o movimento vertical e a convecção. Esse processo intensifica o gradiente de temperatura e pode fortalecer ou enfraquecer o ciclone, aquecendo o setor quente e resfriando o setor frio ou aquecendo o setor frio e resfriando o setor quente (Fig.1). Durante essa fase, começam a se formar frentes distintas: a frente fria, onde o ar frio avança para o setor quente, e a frente quente, onde o ar quente se eleva sobre o ar mais frio. Essas frentes, juntamente com a circulação ciclônica, reforçam os contrastes de temperatura e ajudam a sustentar o desenvolvimento baroclínico.

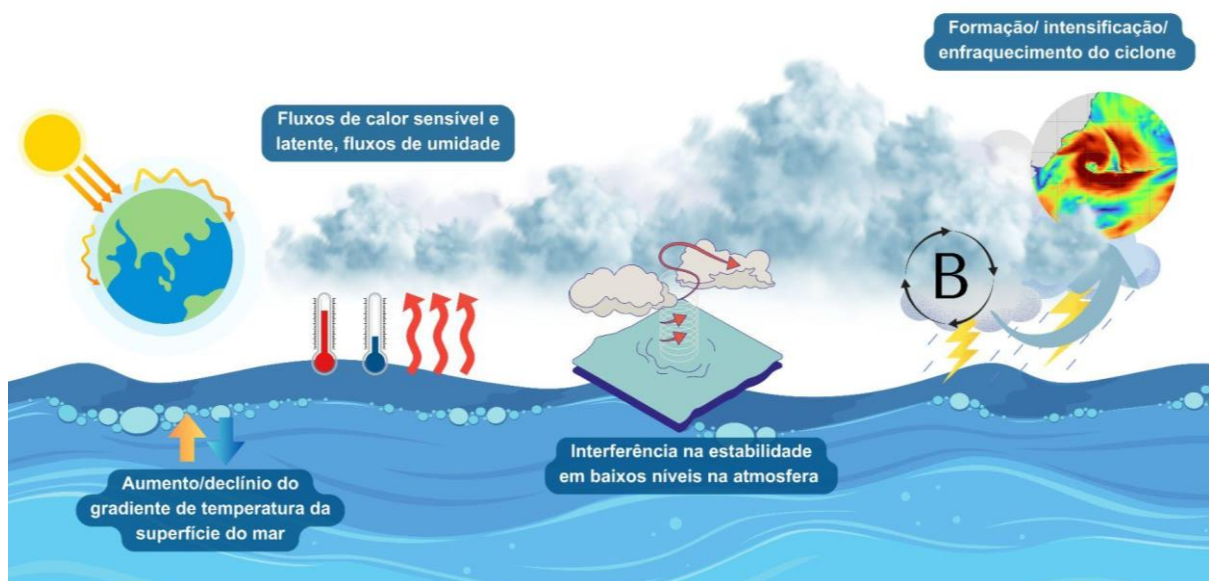


Figura 1: Processos atmosféricos e oceânicos que influenciam a formação, intensificação e enfraquecimento de ciclones extratropicais. À esquerda, o gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) afeta os fluxos de calor sensível e latente, assim como a umidade transferida do oceano para a atmosfera. Esses fluxos impactam a estabilidade atmosférica, levando à formação e intensificação do ciclone (à direita), representado pela área de baixa pressão marcada com "B". O enfraquecimento desses fluxos pode levar a dissipação dos ciclones extratropicais.

Os ciclones extratropicais atuam na escala sinótica, o que significa que operam em uma dimensão horizontal entre 1.000 e 5.000 km e têm uma duração de

vários dias a uma semana [Lackmann, 2011]. Esses sistemas de grande escala influenciam vastas regiões, cobrindo áreas continentais e oceânicas. Na escala sinótica, o desenvolvimento dos ciclones é controlado por grandes gradientes de temperatura e pela movimentação de massas de ar em larga escala. Esses ciclones são caracterizados por frentes bem definidas, associadas a grandes variações de temperatura e vento, que afetam significativamente o clima em escalas regionais e até continentais.

Existem dois modelos principais que explicam a evolução dos ciclones extratropicais: o modelo clássico de Bjerknes e Solberg [1922] e o modelo de Shapiro e Keyser [1990] (Fig.2). No modelo de Bjerknes e Solberg, o desenvolvimento do ciclone está associado à frente polar, onde massas de ar quente e frio se encontram. Um pequeno distúrbio ao longo da frente polar inicia o processo de formação do ciclone, resultando no avanço do ar frio em direção ao equador (frente fria) e na elevação do ar quente sobre o ar frio (frente quente). Com o tempo, a frente fria avança mais rapidamente e eventualmente ultrapassa a frente quente, formando uma frente oclusa. Nessa fase, o ciclone atinge sua máxima intensidade, mas a partir da oclusão, o sistema começa a perder energia, à medida que o contraste térmico diminui, levando à dissipação.

O modelo de Shapiro e Keyser, por outro lado, apresenta algumas diferenças em relação ao modelo clássico. Nesse modelo, as frentes fria e quente não se conectam da mesma forma que no modelo de Bjerknes e Solberg. Em vez disso, a frente fria se move quase perpendicularmente à frente quente, formando um padrão conhecido como "T-bone". Durante o desenvolvimento desse tipo de ciclone, ocorre uma fratura frontal perto do centro, resultando na formação de uma "seclusão quente", que aprisiona ar quente no centro do ciclone. Essa

estrutura cria uma organização distinta dos ventos e das nuvens, influenciando o comportamento do ciclone e seu processo de intensificação.

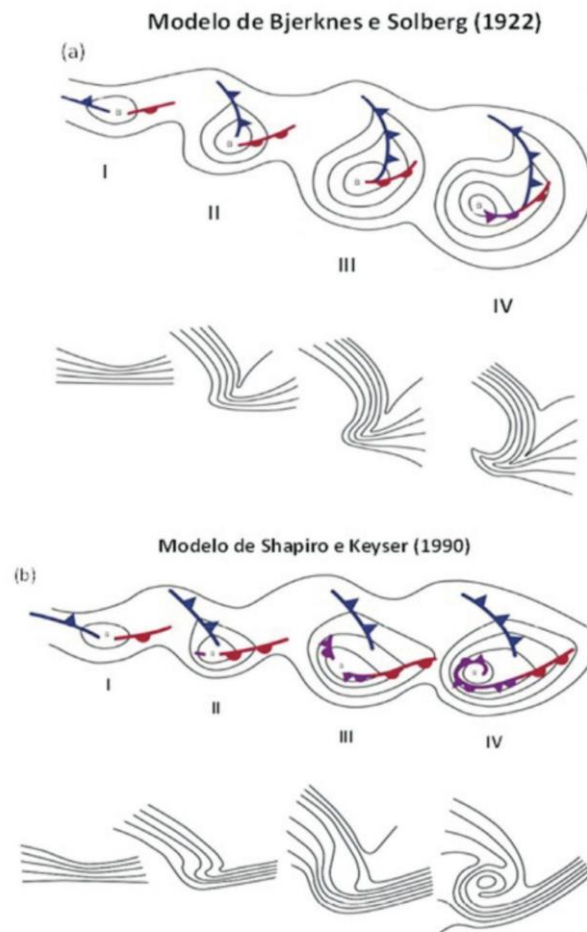


Figura 2: Modelos conceituais do ciclo de vida dos ciclones extratropicais no Hemisfério Sul: a) modelo de Bjerknes e Solberg (1922) e b) modelo de Shapiro e Keyser (1990). O painel superior de cada modelo mostra a altura geopotencial em 850 hPa e as frentes fria (azul), quente (vermelha) e oclusa (roxa). Já o painel inferior apresenta a temperatura potencial também em 850 hPa. Os estágios de vida representam intervalos de 6 a 24 horas. Fonte: Reboita et al., 2017.

Ciclones explosivos, também conhecidos como ciclones-bomba, são uma categoria particular de ciclones extratropicais caracterizados por uma rápida intensificação, ocorrendo quando a pressão central do ciclone cai pelo menos 24 hPa em um período de 24 horas, um processo conhecido como bombogênese

[Bitencourt et al., 2013]. A intensificação rápida de um ciclone é influenciada por uma forte instabilidade baroclínica, marcada por um gradiente horizontal de temperatura significativo, muitas vezes intensificado pela interação entre uma massa de ar polar fria e uma massa de ar subtropical quente [Bjerknes & Solberg, 1922]. No entanto, a intensificação não se deve apenas a esse fator. A interação de outros elementos, como a dinâmica atmosférica em níveis superiores, a liberação de calor latente e as condições da superfície, também desempenham papéis cruciais nesse processo. A combinação dessas variáveis, juntamente com o contraste entre as massas de ar polar e subtropical, contribui significativamente para o desenvolvimento e intensificação do ciclone. São particularmente perigosos devido ao seu desenvolvimento súbito e elevada intensidade, impactando a segurança humana, a infraestrutura e atividades econômicas, especialmente em regiões costeiras [Sondermann et al., 2024].

Apesar de debates sobre o grau de interferência, os fluxos oceânicos desempenham um papel significativo. Existe controvérsia sobre a influência dos fluxos de calor e umidade em casos de ciclones explosivos. Estudos mostram que, embora a formação de ciclones explosivos possa ocorrer independentemente de fluxos oceânicos, simulações sem fluxo de calor latente resultam em ciclones mais fracos [Piva et al., 2008].

A interação entre os ciclones extratropicais e o oceano desempenha um papel importante, especialmente nas regiões onde há correntes quentes, como a Corrente do Brasil e a Confluência Brasil-Malvinas (Fig.3). Essas correntes oceânicas fornecem calor e umidade para a atmosfera, intensificando o ciclone por meio da transferência de calor latente [Vera et al., 2002]. Esse processo é fundamental durante a fase de intensificação, enquanto os fluxos de calor

sensível ajudam a manter os contrastes de temperatura que impulsionam o desenvolvimento do ciclone. A transferência de calor da superfície do oceano para a atmosfera, especialmente sobre correntes quentes, é um fator essencial na dinâmica desses sistemas.

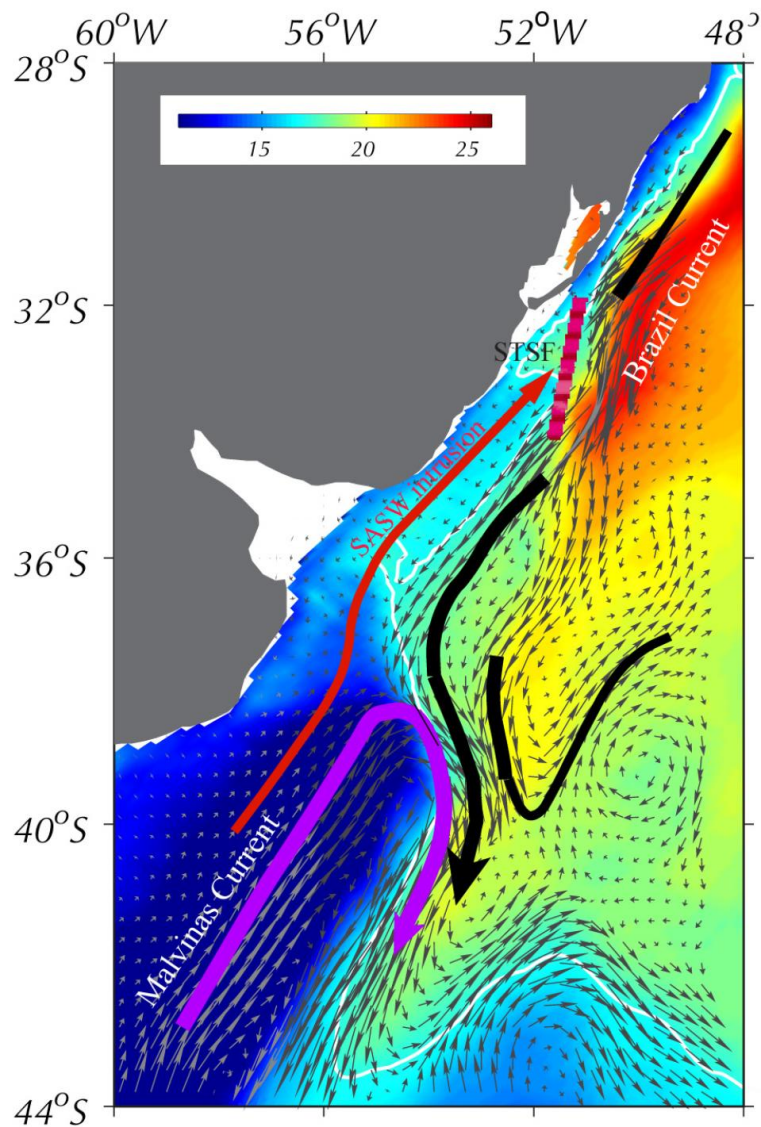


Figura 3: Interação entre a Corrente do Brasil, que transporta águas quentes para o sul, e a Corrente das Malvinas, que traz águas frias do Sul em direção ao norte, formando a Confluência Brasil-Malvinas. O mapa mostra a temperatura da superfície do mar (TSM) e vetores de velocidade, onde é possível identificar a influência dessas correntes, com as águas mais quentes

ao norte associadas à Corrente do Brasil e as águas mais frias ao sul associadas à Corrente das Malvinas. Fonte: Matano et al., 2010.

As regiões próximas à costa leste da América do Sul são particularmente propensas à gênese e intensificação de ciclones extratropicais [Taljaard, 1967; Streten & Troup, 1973; Gan & Rao, 1991; Hoskins & Hodges, 2005]. A América do Sul possui três áreas ciclogênicas (Fig.4): a costa sul-sudeste do Brasil (~30°S), a região do Rio da Prata no Uruguai (~35°S) e a costa sul da Argentina (40°S - 55°S) [Hoskins & Hodges, 2005; Reboita et al., 2010; Gramcianinov et al., 2019]. A alta densidade ciclogênica nessas áreas variam de acordo com a estação do ano (Fig.5) e resultam em vários impactos, incluindo ventos fortes, agitação marítima, inundações costeiras, mudanças de temperatura e precipitação [Machado et al., 2019; Schossler et al., 2020; Gramcianinov et al., 2021]. Projeções climáticas indicam uma diminuição na densidade anual de ciclones em latitudes médias, mas um aumento na intensidade e na extensão das áreas afetadas pela precipitação associada aos ciclones [Reboita et al., 2020].

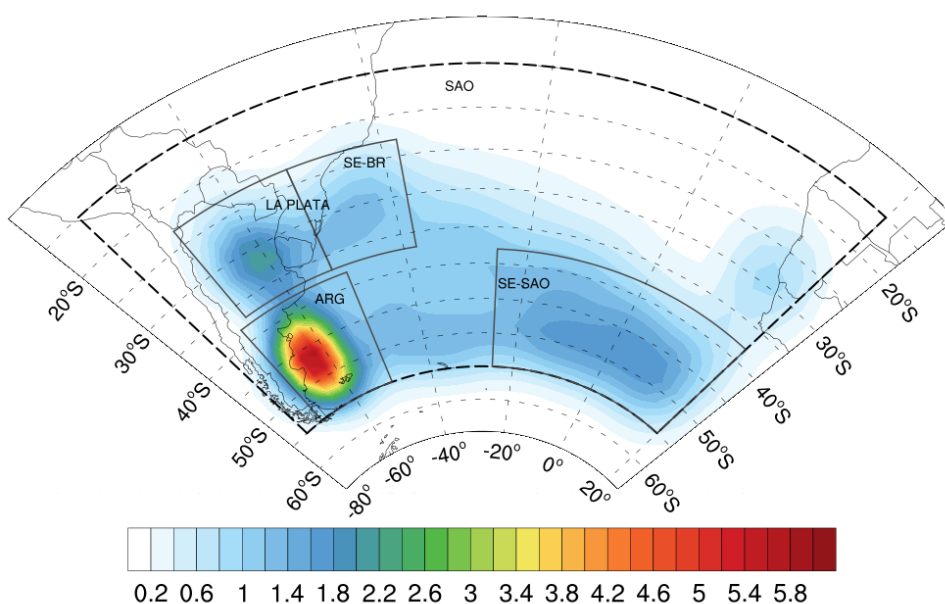


Figura 4: Densidade de gênese para o domínio do Atlântico Sul (marcado em linha cinza tracejada) calculada para todo o período de 1979–2010. As quatro regiões de gênese estão marcadas em linha preta. A unidade de densidade é ciclone por 10^6 km² por mês. Fonte: Gramcianinov et al., 2019.

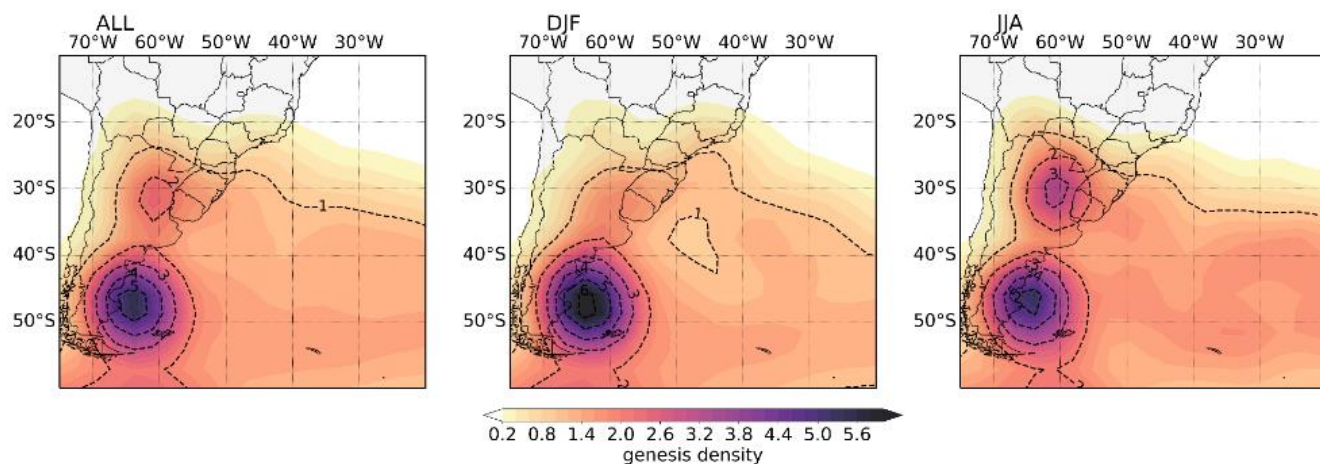


Figura 5: Regiões preferenciais de ciclogênese no oeste do Atlântico Sul entre 1979 e 2020 em (a) todas as estações, (b) verão (DJF) e (c) inverno (JJA). A unidade de densidade é o número de gêneses por mês por 10^6 km². Fonte: Gramcianinov et al., 2022.

É essencial preencher lacunas de conhecimento sobre a influência do oceano no desenvolvimento e intensificação dos ciclones extratropicais. A compreensão mais detalhada dessas interações, como o papel da Corrente do Brasil e a transferência de calor latente, pode melhorar significativamente a capacidade de prever esses sistemas. Além disso, avanços nesse campo possibilitam o aperfeiçoamento de estratégias de mitigação e de previsão, garantindo respostas mais eficazes e assertivas diante dos desafios climáticos relacionados a esses fenômenos atmosféricos. Assim, ao incorporar o feedback positivo da interação entre oceano e atmosfera, podemos expandir nosso entendimento sobre a formação e evolução dos ciclones extratropicais na América do Sul, aprimorando as políticas de prevenção e mitigação dos seus efeitos. [Taljaard, 1967; Hoskins & Hodges, 2005].

Capítulo II: Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Compreender o papel dos fluxos de calor oceânicos na formação e intensificação de ciclones extratropicais na costa da América do Sul.

2.2 Objetivos Específicos

- 1) Analisar as trocas de calor latente e sensível e de umidade entre atmosfera e oceano durante a ciclogênese.
- 2) Entender a relação entre o gradiente de temperatura de superfície do mar (TSM) e a intensificação/enfraquecimento de ciclones extratropicais.
- 3) Identificar os principais mecanismos na interface oceano-atmosfera associados com a ciclogênese na área de estudo.

Capítulo III: Material e Métodos

3.1 Conjunto de Dados

Neste estudo, foram utilizados dados oceânicos e atmosféricos (Tabela 1) do conjunto de reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP): Reanálise do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) [Saha et al., 2010], seguido pelo seu sucessor, *Climate Forecast System version 2* (CFSv2) [Saha et al., 2014].

O CFSR abrange o período de 1979 a 2011 e representa um produto de reanálise de terceira geração, integrando um sistema global de alta resolução acoplado atmosfera-oceano-superfície terrestre-gelo marinho [Saha et al., 2010]. Já o CFSv2, implementado em março de 2011, foi desenvolvido a partir do refinamento do seu sucessor e contempla maiores resoluções temporais e espaciais, execução em modo acoplado e modelos avançados de assimilação

de dados e previsão [Saha et al., 2014]. A transição do CFSR para o CFSv2 foi concluída em outubro de 2012, com uma sobreposição de 1,5 ano para facilitar a adaptação da comunidade de usuários entre os dois sistemas.

O conjunto CFSR/CFSv2 oferece uma resolução atmosférica global de aproximadamente 38 km (T382) e 64 níveis verticais, enquanto o oceano global abrange um espaçamento latitudinal de 0,25° no equador, estendendo-se a 0,5° além dos trópicos, com 40 níveis verticais. Suas saídas, disponíveis com resolução temporal horaria e resolução horizontal de 0,5° de latitude × 0,5° de longitude, são distribuídas pelo *National Climatic Data Center* (NCDC) e NCAR.

O desempenho do CFSv2, especialmente na previsão intrasazonal, contribuiu significativamente para os esforços de previsão sazonal, previsão do MJO e avaliação de riscos [Saha et al., 2014]. As reanálises tornaram-se indispensáveis para previsões operacionais, estudos climáticos e empreendimentos colaborativos.

Embora reanálises amplamente usadas, como o ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) [Hersbach et al., 2020], apresentem maior resolução espacial e temporal, essas reanálises parametrizam o oceano, limitando a capacidade de estudar fluxos oceano-atmosfera em detalhe. O ERA5, por exemplo, utiliza apenas um modelo atmosférico, sem um modelo oceânico acoplado. Por outro lado, a reanálise CFSR/CFSv2 foi desenvolvida através de um modelo acoplado atmosfera-oceano, o *Global Forecast System* (GFS) para a atmosfera e o *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model version 4* (MOM4) para o oceano [Saha et al., 2010]. Esse acoplamento permite uma representação mais precisa

dos fluxos oceânicos, o que é essencial para o entendimento detalhado da ciclogênese e da intensificação dos ciclones, especialmente em áreas costeiras.

Tabela 1: Variáveis oceânicas e atmosféricas do CFSR/CFSv2 utilizadas.

Variável	Unidade
Temperatura da Superfície do Mar	C°
Fluxo de Calor Latente na Superfície do Mar	W/m ²
Fluxo de Calor Sensível na Superfície do Mar	W/m ²
Pressão Média da Superfície do Mar	hPa
Umidade Específica	kg/kg
Taxa de Evaporação menos Precipitação	mm/dia
Componentes Zonal e Meridional do Vento	m/s

3.2 Algoritmo TRACK

A identificação e informações sobre os ciclones extratropicais analisados foram obtidas através do conjunto de dados "*Atlantic extratropical cyclone tracks in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases*" [Gramcianinov et al., 2020b]. Este conjunto de dados abrangeu dados de ciclones, incluindo intensidade e posição, no Oceano Atlântico de 1979 a 2019. O rastreamento desses sistemas foi conduzido usando o método proposto por Hoskins e Hodges [2005] com o programa TRACK [Hodges 1994, 1995, 1999]. O banco de dados incluiu apenas ciclones com um ciclo de vida total ou parcial nas regiões extratropicais (85°S - 25°S, 75°W - 20°E), uma duração mínima de 24 horas e um deslocamento de pelo menos 1000 km. A densidade de ciclogênese foi definida com base na latitude e longitude onde o ciclone foi detectado pela primeira vez pelo algoritmo.

O método utilizou os componentes de vento zonal e meridional em 850 hPa para

determinar a vorticidade relativa e subsequentemente identificar propriedades do ciclone. Em latitudes baixas e médias, o gradiente de pressão superficial é mais intenso, causando a definição de isóbaras apenas quando o ciclone se intensifica ou atinge latitudes mais altas. Portanto, a vorticidade relativa tem vantagens sobre sua alternativa, pressão média ao nível do mar, provando ser mais eficaz na identificação de ciclones em estágios iniciais quando as isóbaras definidas ainda não estão presentes [Sinclair, 1994].

3.3 Seleção dos Casos

Ao examinar a influência dos fluxos oceânicos na ciclogênese, seis casos de ciclones extratropicais nas regiões propensas a ciclones da América do Sul foram selecionados. O estudo concentrou-se em três casos de ciclones explosivos e três eventos não explosivos. Especificamente, foram escolhidos casos relevantes para as áreas costeiras e que causaram impactos à sociedade, entre os anos de 1979 e 2019. Esses estudos de caso foram escolhidos a partir de informações obtidas em reportagens de jornais e artigos científicos, garantindo uma análise de eventos que tiveram impactos notáveis na sociedade e na comunidade científica.

Os ciclones selecionados incluíram casos intensos de maio de 2018 (I1), junho de 2019 (I2) e julho de 2019 (I3). O caso de maio de 2018 (I1), obtido de um jornal, trouxe uma frente fria e causou ondas de até 8 metros ao longo da costa sul do Brasil. O caso de junho de 2019 (I2), também reportado por fontes jornalísticas, provocou chuvas intensas e ventos fortes, resultando em danos na

região de Buenos Aires, na Argentina. O caso de julho de 2019 (I3), relatado na imprensa, trouxe neve para a região sul do Brasil.

Para os ciclones explosivos, os eventos escolhidos ocorreram em setembro de 2016 (B1), março de 2018 (B2) e janeiro de 2019 (B3). O ciclone de setembro de 2016 (B1) foi o mais intenso ciclone extratropical do ano, com rajadas de até 95 km/h, impactando o Uruguai com danos severos causados pelos ventos e interrupções de energia. Os casos de março de 2018 (B2) e janeiro de 2019 (B3), identificados em artigos científicos, causaram condições meteorológicas intensas, incluindo chuvas fortes e ventos intensos, especialmente na região do La Plata. As informações detalhadas sobre esses ciclones, juntamente com os dados meteorológicos associados, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Casos de ciclones com dados meteorológicos associados, incluindo a identificação dos casos, a duração de seu ciclo de vida, datas e horários de início e término, pressão central mínima em hPa e a velocidade máxima do vento em m/s durante cada evento.

Caso	Tempo de Vida	Data e Hora Inicial	Data e Hora Final	Mínima Pressão Central (hPa)	Máxima Velocidade do Vento (m/s)
I1	141h	18-05-2018 18:00 UTC	24-05-2018 15:00 UTC	978	25.1
I2	179h	14-06-2019 18:00 UTC	22-06-2019 05:00 UTC	951	24.2
I3	74h	04-07-2019 22:00 UTC	08-07-2019 00:00 UTC	988	18.7
B1	129h	12-09-2016 14:00 UTC	17-09-2016 23:00 UTC	963	25.6
B2	72h	11-03-2018 03:00 UTC	21-03-2018 03:00 UTC	944	25.3

B3	60h	02-01-2019 09:00 UTC	04-01-2019 21:00 UTC	945	30.6
----	-----	-------------------------	-------------------------	-----	------

Para os eventos não explosivos, a ênfase estava na seleção de casos intensos sem desenvolvimento de bombas para destacar o papel dos fluxos oceânicos. A identificação de ciclones bomba para qualquer latitude envolveu a análise da Taxa Normalizada de Aprofundamento (TNA) da pressão superficial do sistema central na unidade de Bergeron (B), seguindo a Equação 1 conforme descrito por Sanders & Gyakum em 1980. A unidade Bergeron (B) é utilizada na meteorologia para quantificar a intensidade da ciclogênese explosiva, que se refere ao rápido aprofundamento de ciclones extratropicais. O conceito de Bergeron foi introduzido para padronizar a taxa de queda de pressão central em ciclones, levando em consideração a latitude em que eles se formam. O critério básico para que um ciclone seja considerado "explosivo" ou "bomba" é que a sua pressão central caia pelo menos 24 hPa em um período de 24 horas a 60° de latitude norte ou sul. Esta queda de 24 hPa corresponde a uma unidade Bergeron (1 B). A unidade de Bergeron permite a comparação entre ciclones em diferentes latitudes, já que ciclones em latitudes mais baixas tendem a apresentar menores taxas de queda de pressão devido à menor influência do efeito de Coriolis. A aplicação desta métrica é amplamente utilizada para identificar ciclones explosivos e analisar a dinâmica de sua intensificação, conforme discutido por Sanders & Gyakum (1980), que formalizaram o conceito ao estudar a ciclogênese explosiva.

Equação 1: Taxa normalizada de aprofundamento.

$$TNA = \frac{[\Delta p \left(\frac{\sin \phi}{\sin 60^\circ} \right)]}{24 \text{ horas}}$$

Na equação, Δp representa a variação na pressão central do ciclone ao longo de 24 horas, quantificando a mudança na pressão atmosférica no centro do ciclone durante esse intervalo de tempo específico. A latitude média do ciclone explosivo é denotada por ϕ , considerando tanto os pontos de início quanto os pontos finais dessa fase específica no desenvolvimento do ciclone. Quando a TNA, calculada com base em ΔP e ϕ , atinge ou excede 1 Bergeron, o ciclone é caracterizado como uma bomba ou explosivo.

3.4 Classificação do Ciclo de Vida dos Ciclones e Análise de Parâmetros

Cada ciclone é dividido em quatro fases distintas: gênese/incipiente (CG), intensificação (IN), maturidade (MA) e dissipação (DI). Essas fases são classificadas com base na evolução da vorticidade em 850 hPa no centro do ciclone, sendo que a vorticidade máxima corresponde à fase de maturidade. A ciclogênese e a intensificação são caracterizadas pela formação do ciclone e pela diminuição associada da pressão central. Após a fase de maturidade, a fase de dissipação começa, marcada por um declínio ou estabilização da vorticidade.

É importante destacar que essa classificação não é precisa e foi adotada para fornecer uma visualização geral dos fluxos de calor e outros parâmetros. Uma classificação mais precisa levaria em consideração propriedades dinâmicas adicionais, como a assimetria térmica, gradientes de pressão e características atmosféricas em níveis superiores, além da vorticidade. Por exemplo, Hart (2003) introduziu o *Cyclone Phase Space* (CPS), que utiliza métricas de vento

térmico e simetria térmica para classificar ciclones com base na sua evolução estrutural. Da mesma forma, Shapiro e Keyser (1990) apresentaram um modelo conceitual para ciclones extratropicais, destacando a importância das estruturas frontais, interações com a corrente de jato e dinâmicas da tropopausa na compreensão do ciclo de vida dos ciclones. Esses frameworks oferecem uma compreensão mais detalhada do desenvolvimento e da dissipação dos ciclones, sendo particularmente úteis para analisar suas interações com fluxos de calor e outros processos atmosféricos.

A evolução temporal dos fluxos de calor e da umidade específica foi escolhida para auxiliar na quantificação desses parâmetros. Foram utilizados os valores máximos e mínimos para capturar de forma mais precisa a variabilidade dos fluxos dentro de um raio de 10° do centro do ciclone, em vez da média. Essa abordagem foi preferida devido à heterogeneidade significativa dos valores dos fluxos de calor e da umidade específica, especialmente na região próxima ao centro do ciclone. O uso da média poderia mascarar variações importantes nos dados, pois tende a suavizar os valores extremos e reduzir a sensibilidade a mudanças localizadas. Ao focar nos valores máximos e mínimos, foi possível visualizar de maneira mais clara os fluxos e capturar toda a gama de variabilidade, proporcionando uma representação mais fiel do comportamento do ciclone e de seu impacto no ambiente ao redor.

Capítulo IV: Artigo Científico: Impacts of ocean heat and moisture fluxes on extratropical cyclone development in the South Atlantic

Para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, é requerido que o discente realize a submissão de pelo menos um artigo científico como primeiro autor em periódico com corpo indexado. Desse modo, os resultados da pesquisa desenvolvida durante o período de mestrado e a discussão dos resultados serão apresentados em forma de artigo neste Capítulo. O manuscrito, de autoria de Camila Ferreira Russo, Dra. Carolina Barnez Gramcianinov e Prof. Dr. Fabrício Sanguinetti Cruz De Oliveira, é intitulado **“Impacts of ocean heat and moisture fluxes on extratropical cyclone development in the South Atlantic”** e foi submetido para publicação no periódico **“International Journal of Climatology”** no dia 19 de outubro de 2024.

Impacts of ocean heat and moisture fluxes on extratropical cyclone development in the South Atlantic

Ocean Heat Flux Impacts on Extratropical Cyclone Development

Authors: Camila Ferreira Russo¹, Carolina Barnez Gramscianinov², Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira³

¹Federal University of Rio Grande (FURG), Avenida Itália, Km 8 - Carreiros, Rio Grande - RS, 96203-900 - Laboratory of Dynamical and Satellite Oceanography (LODS), Brazil; ²Helmholtz-Zentrum Hereon - Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht, Germany.

¹camila.russo@icloud.com; ²cbgramscianinov@gmail.com; ³fsoliveira@furg.br

Abstract

Extratropical cyclones are meteorological systems that significantly influence South America's climate through complex interactions between contrasting air masses and ocean-atmosphere dynamics. This study investigates the role of ocean heat fluxes in the formation and intensification of extratropical cyclones over the South Atlantic. We analyzed latent and sensible heat and humidity exchanges between the atmosphere and ocean throughout the life cycle of six case studies, including three intense and three explosive cyclones offshore the coast of South America. Data from the CFSR/CFSv2 reanalysis provided parameters such as latent and sensible heat fluxes, specific humidity, zonal and meridional wind components, and sea surface temperature (SST) at 6-hour intervals. The results indicate that latent heat flux associated with SST plays a

fundamental role in baroclinic development, while sensible heat fluxes have a secondary role affecting the cyclones' deepening rates. Specific humidity in the warm sector was a crucial factor in the intensification of all the cases studied. As the cyclones dissipate, a weakening of the system is observed, accompanied by a decrease in heat fluxes. This study enhances our understanding of the oceanic influences on extratropical cyclones, improving the ability to monitor and forecast these impactful weather systems.

Keywords: Extratropical cyclones; Ocean heat fluxes; Cyclogenesis; Atmosphere-ocean interaction; South America.

FUNDING STATEMENT

This research was supported by CAPES - PROEX (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel), which provided a monthly grant for 24 months. The authors gratefully acknowledge this financial support, which made the study possible.

4.1 Introduction

Extratropical cyclones are surface low-pressure systems formed at mid-latitudes (extratropics) and characterized by a horizontal temperature gradient (Bjerknes 1919, Bjerknes & Solberg 1922). The occurrence of these cyclones significantly impacts the weather and climate of South America (Reboita et al. 2005). The formation and development of these systems, known as cyclogenesis, are strongly influenced by oceanic variables, particularly through heat and moisture exchanges at the ocean-atmosphere interface (e.g., Vera et al. 2002, Gozzo et al. 2013). Therefore, understanding these processes is essential for

comprehending, monitoring, and forecasting extratropical cyclones along the South Atlantic coast.

Two accepted conceptual models describe the life cycle of extratropical cyclones, differing in the movement of the cyclone's cold front relative to the warm front. The Bjerknes-Solberg model, also known as the Polar Front Theory, focuses on the interaction of cold polar air and warm subtropical air along a front. As a wave forms on this front, the cyclone progresses through distinct phases: formation, intensification, maturity, and dissipation. The cold front advances more quickly than the warm front, driven by the denser cold air, eventually overtaking the warm front and causing occlusion. This occluded phase represents the cyclone's peak intensity. Once the warm air is fully lifted, the cyclone becomes a cold-core structure and gradually dissipates, as no further temperature gradient is available to fuel it. This model describes cyclones with a stronger north-south elongation due to the dominance of the cold front, resulting in a more vertically intense system (Bjerknes & Solberg, 1922). In contrast, the Shapiro-Keyser model addresses some of the limitations of the Bjerknes-Solberg framework, particularly for maritime cyclones that deviate from the classic occlusion process. In this model, the cold front does not wrap around the cyclone center but instead runs almost perpendicular to the warm front, forming a "T-bone" pattern. A key feature of this model is the development of a "bent-back front," where the warm front wraps around the cyclone, leading to a warm seclusion near the center. This seclusion results in an east-west elongation of the system, with the distinct evolution of the cold and warm sectors (Shapiro & Keyser, 1990). This configuration is commonly seen in intense maritime cyclones, where a warm-core

seclusion persists near the center, often resulting in stronger and longer-lasting systems (Schultz & Wernli, 2001).

South America has three cyclogenetic regions: the coastal area of southern and southeastern Brazil (30°S), the La Plata region in Uruguay (35°S), and the southern coast of Argentina (from 40°S to 55°S) (Hoskins & Hodges 2005, Reboita et al. 2010, Gramscianinov et al. 2019). Cyclone forming and developing near the coastal areas result in significant impacts, including strong winds, maritime agitation, coastal flooding, abrupt temperature changes, and intense precipitation (e.g., Machado et al. 2019, Schossler et al. 2020, Gramscianinov et al. 2021).

Explosive cyclones, also known as bomb cyclones, are a particular type of extratropical cyclone characterized by rapid intensification. This phenomenon occurs when the central pressure of the cyclone drops by at least 24 hPa within a 24-hour period at 60°N, a process known as bombogenesis (Sanders & Gyakum 1980). The rapid pressure drops is typically driven by intense baroclinic instability, which is characterized by a strong horizontal temperature gradient. However, additional factors such as the interaction between upper-level atmospheric dynamics, latent heat release, and surface conditions, also play crucial roles in the intensification process. Bomb cyclones form when cold polar air masses interact with warm subtropical air masses, enhancing the cyclone's development (Sanders & Gyakum 1980). The rapid intensification of these systems leads to severe weather conditions, including strong winds, heavy precipitation, and significant temperature changes (Sanders & Gyakum 1980). Bomb cyclones are particularly interesting due to their sudden development and intensity, which can threaten human safety, damage infrastructure, and disrupt

economic activities, particularly in coastal areas (Vera et al. 2002). Understanding the mechanisms behind their formation and intensification, especially the role of oceanic heat and moisture fluxes, is essential for improving forecasting models and mitigating the severe impact of these systems (Piva et al. 2008).

Oceanic heat and moisture fluxes, along with sea surface temperature (SST) gradients, play a crucial role in the formation and intensification of extratropical cyclones. While there is some debate regarding the extent of their influence, these factors are undeniably significant in the dynamics of cyclone development. The controversy particularly centers around the role of heat and moisture fluxes in explosive cyclones. Studies have shown that while these cyclones can form independently of oceanic fluxes, simulations excluding latent heat fluxes result in weaker systems (Piva et al. 2008). The interaction between the Brazil and Malvinas Currents is particularly relevant in this context, as it creates sharp SST gradients that enhance baroclinic instability, promoting cyclone intensification. The warm waters from the Brazil Current provide heat and moisture that fuel cyclonic development, while the cold Malvinas Current increases temperature contrasts, promoting baroclinic growth. These oceanic fluxes are essential in intensifying cyclones as they move offshore, where reduced atmospheric stability further supports rapid cyclogenesis (Vera et al., 2002).

Such cyclones can impact economic activities, particularly those dependent on maritime navigation, including fishing, oil exploration, and port operations (e.g., Nunes et al. 2018). Addressing the knowledge gaps concerning the ocean's role in extratropical cyclone dynamics is critical not only for improving mitigation strategies but also for advancing forecasting capabilities. Analysis of projection

results by Reboita et al. (2020) suggest a decrease in the annual density of cyclones at mid-latitudes but anticipate an increase in their intensity and the geographic extent of areas affected by cyclone-associated precipitation. This study aims to understand how oceanic heat fluxes influence the formation and intensification of extratropical cyclones along the South America coast. For this, we will investigate latent and sensible heat and moisture exchanges during cyclogenesis, the relationship between SST gradient variations and cyclone intensification or weakening, and the primary mechanisms at the ocean-atmosphere interface that drive cyclogenesis in the study area.

4.2 Data and Methodology

4.2.1 Datasets

The dataset used for oceanic and atmospheric data in this study comes from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), starting with the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha et al., 2010), followed by the Climate Forecast System version 2 (CFSv2) (Saha et al., 2014). CFSR, a third-generation reanalysis product, covers the period from 1979 to 2011 and integrates a high-resolution coupled atmosphere-ocean-land surface-sea ice system. In March 2011, CFSv2 was introduced, offering higher temporal and spatial resolutions, coupled-mode execution, and improvements in data assimilation and forecast models. The transition from CFSR to CFSv2 was finalized in October 2012, with a 1.5-year overlap to ensure user adaptation.

The CFSR/CFSv2 data provides global atmosphere resolution at approximately 38 km (T382) and 64 vertical levels, while the global ocean component has a latitudinal resolution of 0.25° at the equator, extending to 0.5° at higher latitudes,

with 40 vertical levels. Outputs are available at hourly time resolution and a horizontal resolution of 0.5° latitude \times 0.5° longitude and are distributed by the National Climatic Data Center (NCDC) and NCAR.

Unlike other reanalysis, such as ERA5 from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Hersbach et al., 2020) which employs only an atmospheric model, the CFSR/CFSv2 reanalysis uses a coupled atmosphere-ocean model. Specifically, it integrates the Global Forecast System (GFS) for the atmosphere with the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model version 4 (MOM4) for the ocean (Saha et al., 2010), providing a more accurate representation of oceanic fluxes and their interaction with the atmosphere.

The superior performance of CFSv2, especially in intraseasonal and seasonal predictions, has greatly contributed to advancements in the prediction of the MJO and in the assessment of climate-related hazards (Saha et al., 2014). Reanalysis has become indispensable tools for operational forecasting, climate research, and collaborative projects like multimodel ensembles.

4.2.2 TRACK algorithm

The identification and analysis of extratropical cyclones were based on the dataset "Atlantic extratropical cyclone tracks in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases" (Gramcianinov et al. 2020b). This comprehensive dataset includes cyclone data such as intensity and position in the Atlantic Ocean from 1979 to 2019. Cyclone tracking was conducted using the method proposed

by Hoskins and Hodges (2005) with the TRACK program (Hodges 1994, 1995, 1999). The database contains only cyclones with either a complete or partial life cycle in the extratropics ($85^{\circ}\text{S} - 25^{\circ}\text{S}$, $75^{\circ}\text{W} - 20^{\circ}\text{E}$), a minimum duration of 24 hours, and a displacement of at least 1000 km. Cyclogenesis density was defined by the latitude and longitude where the cyclone was first detected by the algorithm. For more detailed tracking settings and validation, refer to Gramcianinov et al. (2020a).

The tracking method employed the zonal and meridional wind components at the 850 hPa level to determine relative vorticity, which was then used to identify cyclone properties. In low and mid-latitudes, the surface pressure gradient tends to be more intense, so isobars are typically defined only when the cyclone intensifies or reaches higher latitudes. Therefore, using relative vorticity offers advantages over mean sea level pressure, particularly in identifying cyclones at early stages when well-defined isobars have not yet formed (Sinclair 1994).

4.2.3 Case selection

The influence of oceanic fluxes on cyclogenesis was investigated through six selected cases of extratropical cyclones in regions of South America prone to such events. The study analyzed three bomb (B) and three non-explosive but intense (I) cyclones, with an emphasis on those that significantly impacted coastal areas and communities. These case studies, spanning from 1979 to 2019, were chosen based on reports from newspapers and scientific articles to ensure the inclusion of events with both societal and scientific relevance.

The selected intense cyclones occurred in May 2018 (I1), June 2019 (I2), and July 2019 (I3), all of them reported in the media. Case I1 involved a cold front that generated 8-meter waves along the southern coast of Brazil. Case I2 caused intense rainfall and strong winds, resulting considerable damage in the Buenos Aires region, Argentina. Similarly, case I3 brought snowfall in the southern Brazil.

For the bomb cyclones, the selected events occurred in September 2016 (B1), March 2018 (B2), and January 2019 (B3). Case B1 was the most intense extratropical cyclone of that year, with gusts reaching up to 95 km/h, and causing severe wind damage and power outages in Uruguay. The cases B2 and B3, identified in scientific articles (Andrade et al., 2022), were marked by extreme weather conditions, including heavy rainfall and strong winds, particularly affecting the La Plata region. Detailed information about these cyclones, along with the associated meteorological data, is presented in Table 4.1.

Table 4.1: The cyclone cases with associated meteorological data, including case identification, lifespan duration, start and end dates with times, minimum central pressure (in hPa), and the maximum wind speed (in m/s) recorded during each event.

Case	Lifetime	Start Date and Time	End Date and Time	Minimal Central Pressure (hPa)	Maximal Wind Speed (m/s)
I1	141h	2018-05-18 18:00 UTC	2018-05-24 15:00 UTC	978	25.1
I2	179h	2019-06-14 18:00 UTC	2019-06-22 05:00 UTC	951	24.2
I3	74h	2019-07-04 22:00 UTC	2019-07-08 00:00 UTC	988	18.7

B1	129h	2016-09-12 14:00 UTC	2016-09-17 23:00 UTC	963	25.6
B2	72h	2018-03-18 03:00 UTC	2018-03-21 03:00 UTC	944	25.3
B3	60h	2019-01-02 09:00 UTC	2019-01-04 21:00 UTC	945	30.6

4.2.4 Bomb Cyclone identification

After the initial selection, each case was analyzed to verify whether the cyclone met the criteria to be classified as an explosive cyclone, or "bomb," using the Normalized Deepening Rate (NDR) of the central surface pressure, expressed in the Bergeron units (B), as defined by Sanders & Gyakum in 1980. This analysis followed Equation 1 from their study, which standardizes the rate of pressure drop relative to latitude.

$$(1) \quad NDR = \frac{\left[\Delta p \left(\frac{\sin \phi}{\sin 60^\circ} \right) \right]}{24 \text{ hours}}$$

where Δp represents the 24-hour change in the cyclone's central surface pressure and ϕ is the mean latitude during its explosive phase. A cyclone is classified as a bomb when the NDR is equal to or higher than 1 Bergeron or higher, indicating a rapid intensification of the system.

For this analysis, central pressure data were obtained using the TRACK algorithm, which provided detailed information about the evolution of the cyclonic systems. This allowed for the calculation of pressure changes and determination of whether the cyclone met the bomb criterion.

4.2.5 Cyclone Lifecycle Classification and Parameter Analysis

Each cyclone's lifecycle is divided into four distinct phases: genesis/incipient (CG), intensification (IN), maturity (MA), and dissipation (DI). These phases are classified based on the evolution of vorticity at 850 hPa in the cyclone's center, with the maximum vorticity corresponding to the mature phase. Cyclogenesis and intensification are characterized by the formation of the cyclone and the associated decrease in central pressure. Following the mature phase, the dissipation phase begins, marked by a decline or stabilization of vorticity.

It is important to note that this classification is not precise and was adopted to provide a general visualization of heat fluxes and other parameters. A more accurate classification would consider additional dynamical properties, such as thermal asymmetry, pressure gradients, and upper-level atmospheric features, alongside vorticity. For example, Hart (2003) introduced the Cyclone Phase Space (CPS), which uses thermal wind and thermal symmetry metrics to classify cyclones based on their structural evolution. Similarly, Shapiro and Keyser (1990) outlined a conceptual model for extratropical cyclones, emphasizing the importance of frontal structures, jet stream interactions, and tropopause dynamics in understanding the lifecycle of cyclones. These frameworks provide a more detailed understanding of cyclone development and decay, which is particularly useful for analyzing their interactions with heat fluxes and other atmospheric processes.

The time evolution of heat fluxes and specific humidity was selected to aid in quantifying these parameters. Maximum and minimum values were used to better capture the variability of fluxes within a 10° radius from the cyclone's center, as

opposed to the mean. This approach was preferred because the values of heat fluxes and specific humidity exhibit significant heterogeneity, especially in the region within a 10° radius from the cyclone's center. Using the mean could obscure important variations in the data, as it tends to smooth out extreme values and reduce the sensitivity to localized changes. By focusing on the maximum and minimum values, we were able to better visualize the fluxes and capture the full range of variability, providing a more accurate representation of the cyclone's behavior and its impact on the surrounding environment.

4.3 Results

4.3.1 Temporal and Spatial Variability of Cyclones

The lifecycle phases of the intense cyclones are presented on Fig. 4.2a-c., which tracks the evolution of central surface pressure and vorticity over their lifetime. Case I1 began intensifying shortly after forming along the southern coast of Brazil (Fig. 4.1), peaking at a central pressure of 980 hPa (Fig. 4.2a). This case displayed a relatively long lifecycle marked by steady, gradual intensification. In contrast, I2, which formed over the continent and then moved toward the ocean (Fig. 4.1), lasted for approximately eight days (179 hours). It featured two notable intensification phases, with the strongest phase reaching a central pressure of 950 hPa (Fig. 4.2b). This case highlights the variability in cyclone behavior, as multiple intensification stages contributed to its extended duration. Case I3, which originated near the La Plata region, had a shorter lifespan compared to I1 and I2 (74 hours). It experienced three distinct intensification phases, with the most intense reaching a central pressure of 990 hPa (Fig. 4.2c). Unlike the other cases, I3 demonstrated rapid changes in intensity without undergoing bomb development.

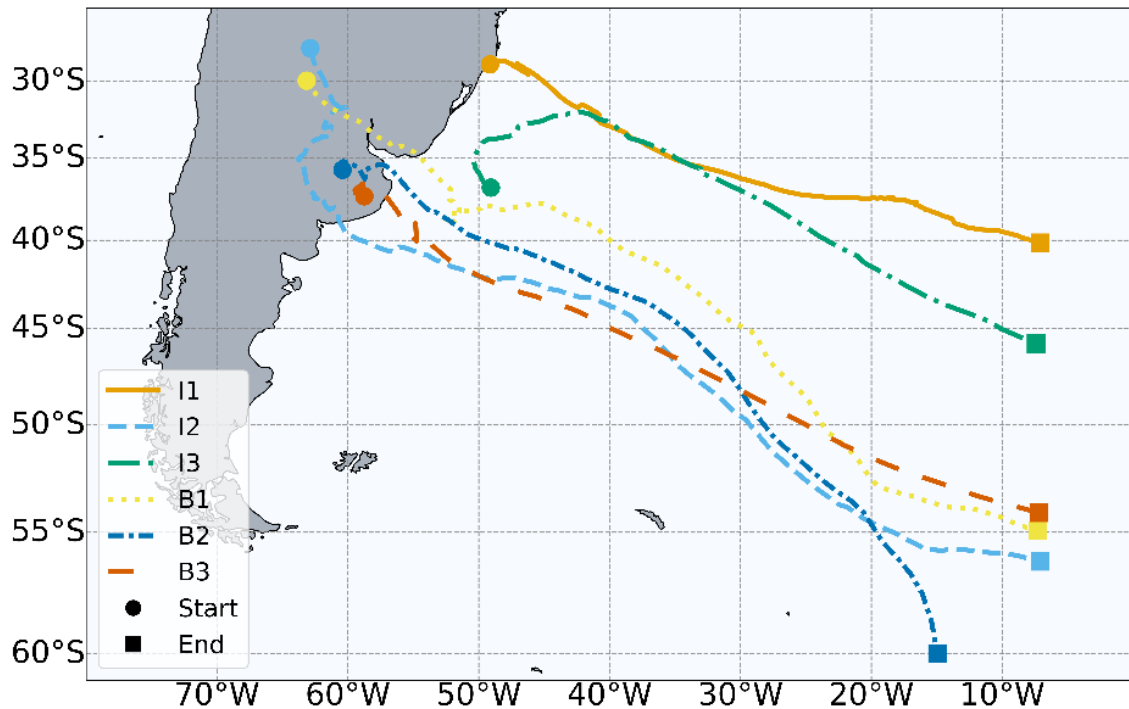


Figure 4.1: Tracks of the six selected extratropical cyclones, intensens and bombs, in the South Atlantic Ocean. I and B denote Intense and Bomb cyclone cases, respectively.

Bomb cyclones, as seen in the B1 and B2 cases, also exhibited variability in their temporal characteristics. B1, which lasted five days (129 hours), originated over the continent and dissipated over the ocean (Fig. 4.1). In contrast, the B2 cyclone had a shorter duration of three days (72 hours), forming over the La Plata region (Fig. 4.1). Despite these differences, both cases experienced rapid intensification (Fig. 4.2d-e), but varied in terms of their lifespans and geographic origins. Finally, B3 formed near 40°S over the continent and lasted two days (Fig. 4.1). Despite its short duration, B3 experienced a sharp drop in central pressure, reaching 950 hPa (Fig. 4.2f). This yet explosive event underscores the diverse range of cyclone behavior, further contributing to the observed variability within this study.

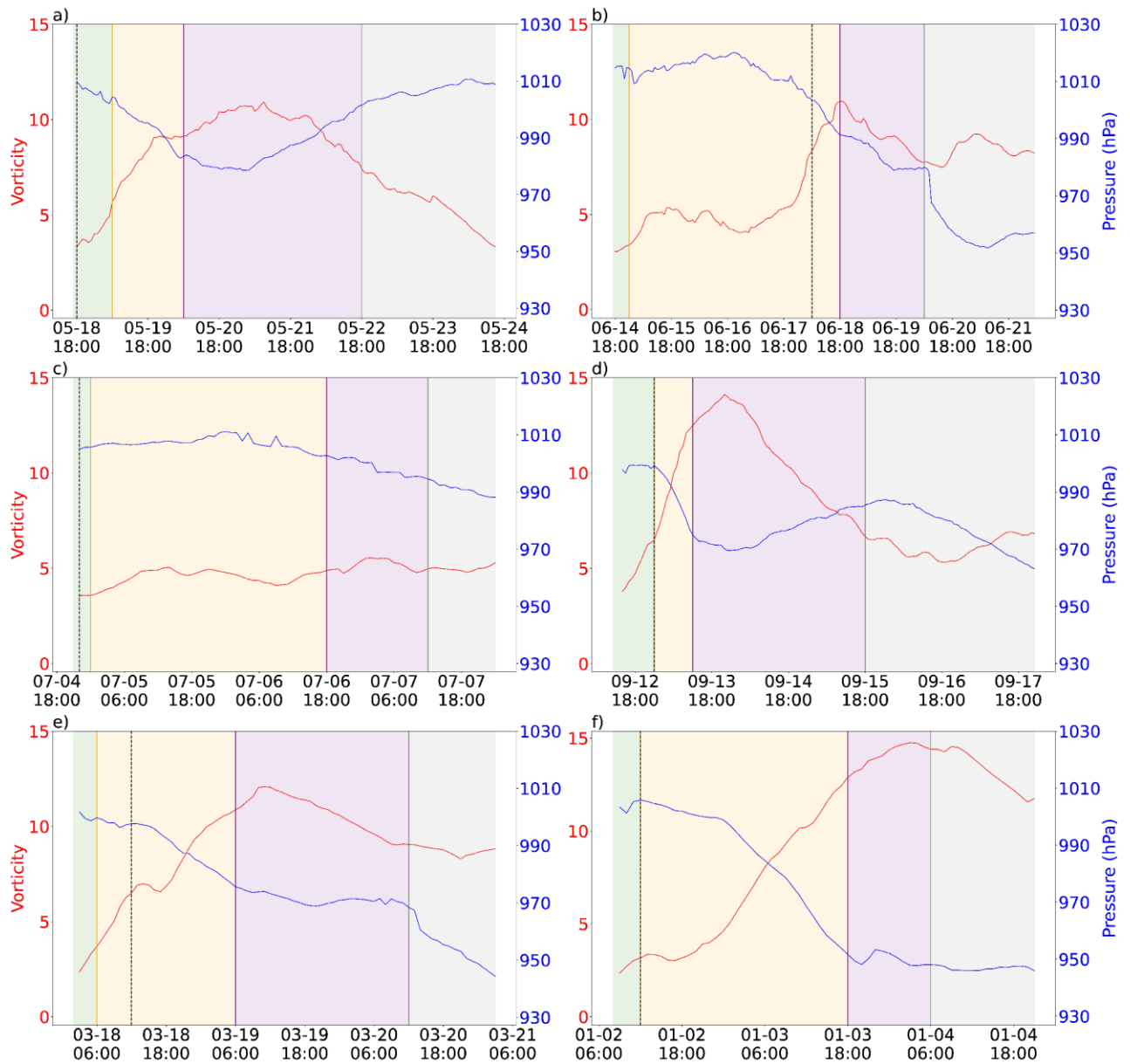


Figure 4.2: Time evolution of central surface pressure and vorticity for six selected cyclones is depicted, with red lines representing vorticity at 850 hPa (scaled by -1×10^{-5}), and the blue lines indicating the system's central surface pressure (hPa). The cyclone's life phase is separated as genesis (green), intensification (yellow), maturity (purple), and dissipation (gray). The plots correspond to the following cyclone cases: I1 (a), I2 (b), I3 (c), B1 (d), B2 (e), and B3 (f). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

The temporal and spatial variability of these cyclones indicate different acting processes, likely to be related to atmospheric-ocean interactions. The gradual, extended intensification of I1 and I2 contrasts sharply with the rapid, non-

explosive development of I3, each case presenting unique cyclone behavior patterns within the region. Bomb cyclones such as B1, B2, and B3 demonstrate extreme variability in cyclone evolution, with their explosive intensification highlighting complexity of extreme weather phenomena, which will be further analyzed in detail in the following sections.

4.3.2 Influence of Oceanic Fluxes, Sea Surface Temperature and Moisture Fluxes

In I1, both sensible and latent heat fluxes intensified before and during the cyclone's formation (Fig. 4.3a-b), playing an important role in cyclogenesis. Sensible heat flux affected the horizontal temperature gradient across the cyclone's fronts, with higher values observed on the warm front and lower values on the cold front (Fig. 4.4d, i). During intensification, sensible heat flux peaked at 350 W/m^2 and dropped -200 W/m^2 (Fig. 4.5b), indicating strong temperature contrasts within cyclone fronts. Despite fluctuations, the overall pattern of higher flux on the warm front and lower flux on the cold front persisted throughout the cyclone's lifecycle. During the intensification and maturity, the cyclone interacted with warm ocean waters (Fig. 4.4a, f), enhancing heat and moisture transfer to the atmosphere and fueling the system. Latent heat flux peaked at over 700 W/m^2 during the transition between intensification and maturity (Fig. 4.4h; Fig. 4.5c), which was crucial in maintaining the cyclone's energy and supporting further development.

Specific humidity and the evaporation-minus-precipitation rate (Fig. 4.4e, j) highlighted the role of oceanic heat fluxes, with higher humidity in the warm sector

of the cyclone, driving heavy rainfall along the cold front. Specific humidity remained elevated in the cold front throughout the cyclone's development (Fig. 4.5d), emphasizing its importance in sustaining the cyclone's energy via moisture transfer. The evaporation-minus-precipitation rate highlighted the cyclone's precipitation patterns, particularly along the cold front, where the interaction of warm moist air and colder air mass caused significant rainfall.

Meanwhile, I2 exhibited similar patterns, but with latent heat flux intensifying during the approach to maturity, peaking at 600 W/m^2 (Fig. 4.6h; Fig. 4.7c). This heat transfer played a critical role in maintaining the cyclone's energy, although it had less impact during the earlier cyclogenesis and intensification (Fig. 4.3c; Fig. 4.6c). Throughout the cyclone's lifecycle, sensible heat flux followed a similar behavior of latent heat flux, with strong negative values during intensification, reaching -400 W/m^2 (Fig. 4.6i; 4.7b), indicating, especially on the cold front. SST was pivotal in intensifying the cyclone as it moved over warm ocean waters (Fig. 4.6a, f), increasing heat and moisture transfer from the ocean to the atmosphere and strengthening the system. As the cyclone weakened, sensible heat flux and SST contributed to its dissipation, marking a transition phase in the cyclone's lifecycle. Specific humidity was vital to the cyclone's development, gradually decreasing over its lifecycle (Fig. 4.7d). Early on, during cyclogenesis and intensification, higher specific humidity provided the moisture needed for cloud formation and convection. The interaction between warm SST and the atmosphere maintained elevated moisture levels in the cyclone's warm sector (Fig. 4.6e, j), which was crucial for maintaining the system.

As the cyclone intensified, specific humidity remained elevated, particularly near its center, driving the latent heat release from condensed water vapor and further

fueling the system. However, during the transition to maturity, specific humidity began to decline as the cyclone moved away from warmer SSTs and became increasingly influenced by cold, dry air from higher latitudes. This decline marked the onset of cyclone's de-intensification, with the evaporation-minus-precipitation rate (Fig. 4.6e, j) indicating the growing dominance of cold and dry air. The reduced moisture intake, particularly in the warm sector, limited the cyclone's capacity for sustained convection. In the dissipation phase, as the cyclone's access to moisture diminished, specific humidity decreased further. This loss of moisture, combined with declining heat exchanges from the ocean, significantly weakened the system. The rising evaporation-minus-precipitation rate along the cold front during this phase underscored the ongoing de-intensification of the warm sector due to decreased heat fluxes. These diminishing exchanges of heat and moisture were crucial to the cyclone's eventual dissipation.

In case I3, heat fluxes were already significant before cyclogenesis (Fig. 4.3e-f). Latent heat flux steadily increased during the intensification phase (Fig. 4.8c, h), peaking at 800 W/m^2 24 hours maturity, providing intense energy to the cyclone's warm sector (Fig. 4.9c). Simultaneously, sensible heat flux reached extremes, peaking at 300 W/m^2 and dropping to -200 W/m^2 (Fig. 4.9b). As the cyclone entered its most intense phase, sensible heat flux weakened (Fig. 4.8i), sharpening the temperature gradient between the warm and cold fronts. The weakening of sensible heat transfer intensified cooling effects, especially along the cold front, which in turn enhanced the cyclone's overall structure.

Specific humidity closely followed the warm sector, with elevated levels fueling the cyclone's development. From the maturity phase through to dissipation, the evaporation-minus-precipitation rate became increasingly negative (Fig. 4.8e, j),

signaling intensified precipitation along the cold front as the system weakened. Specific humidity peaked during the maturity phase, closely following the warm sector (Fig. 4.9d). This high moisture content helped sustain the cyclone through intensification and maturity by promoting cloud formation and latent heat release. As the cyclone transitioned into its dissipation phase, the evaporation-minus-precipitation rate showed even more negative values, reflecting increased precipitation along the cold front and further contributing to the cyclone's weakening.

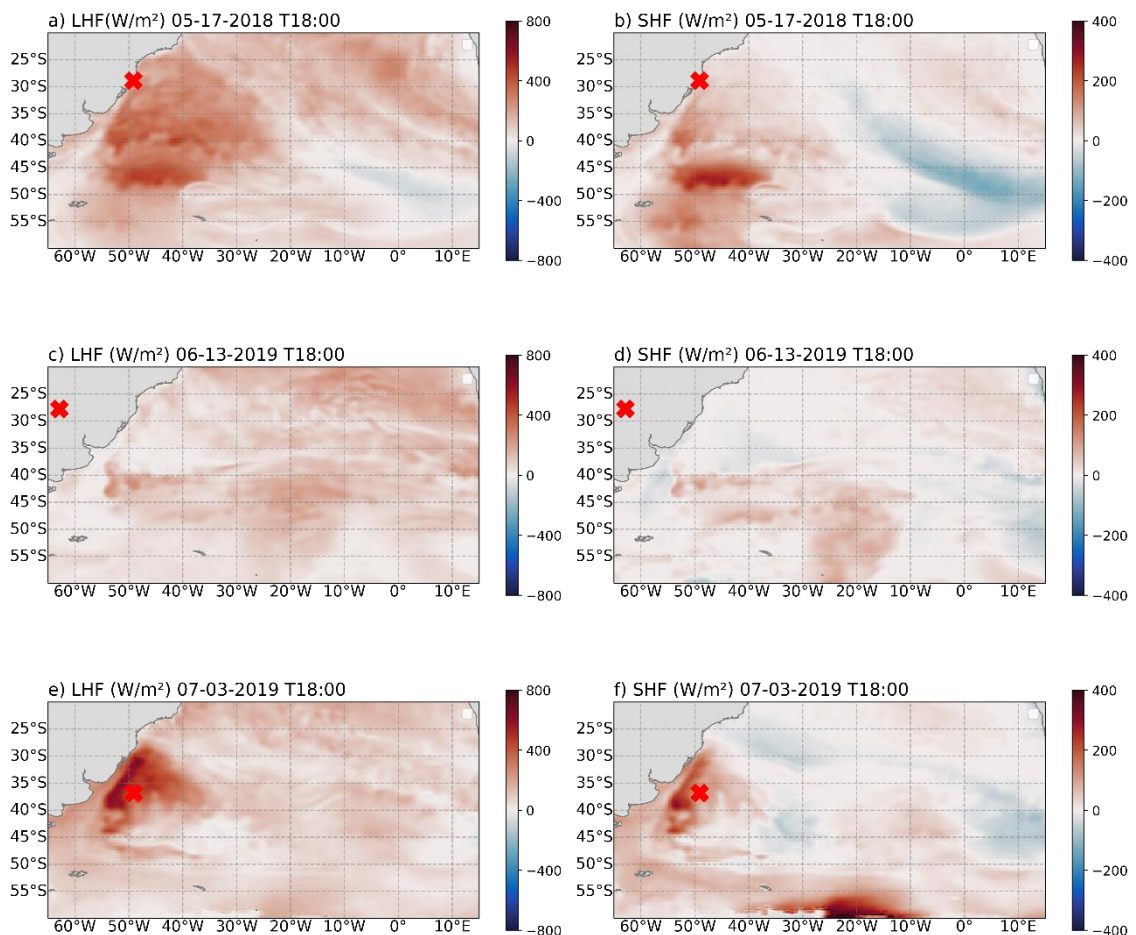


Figure 4.3: Approximately 24h before cyclogenesis for the intense cases: I1 - May 17 18:00; I2 - June 13 18:00; I3 - July 03 18:00. a, c, e) Latent heat flux in W/m². b, d, f) Sensible heat flux in

W/m². The “X” symbol represents the position of cyclogenesis for visual reference of the cyclone location.

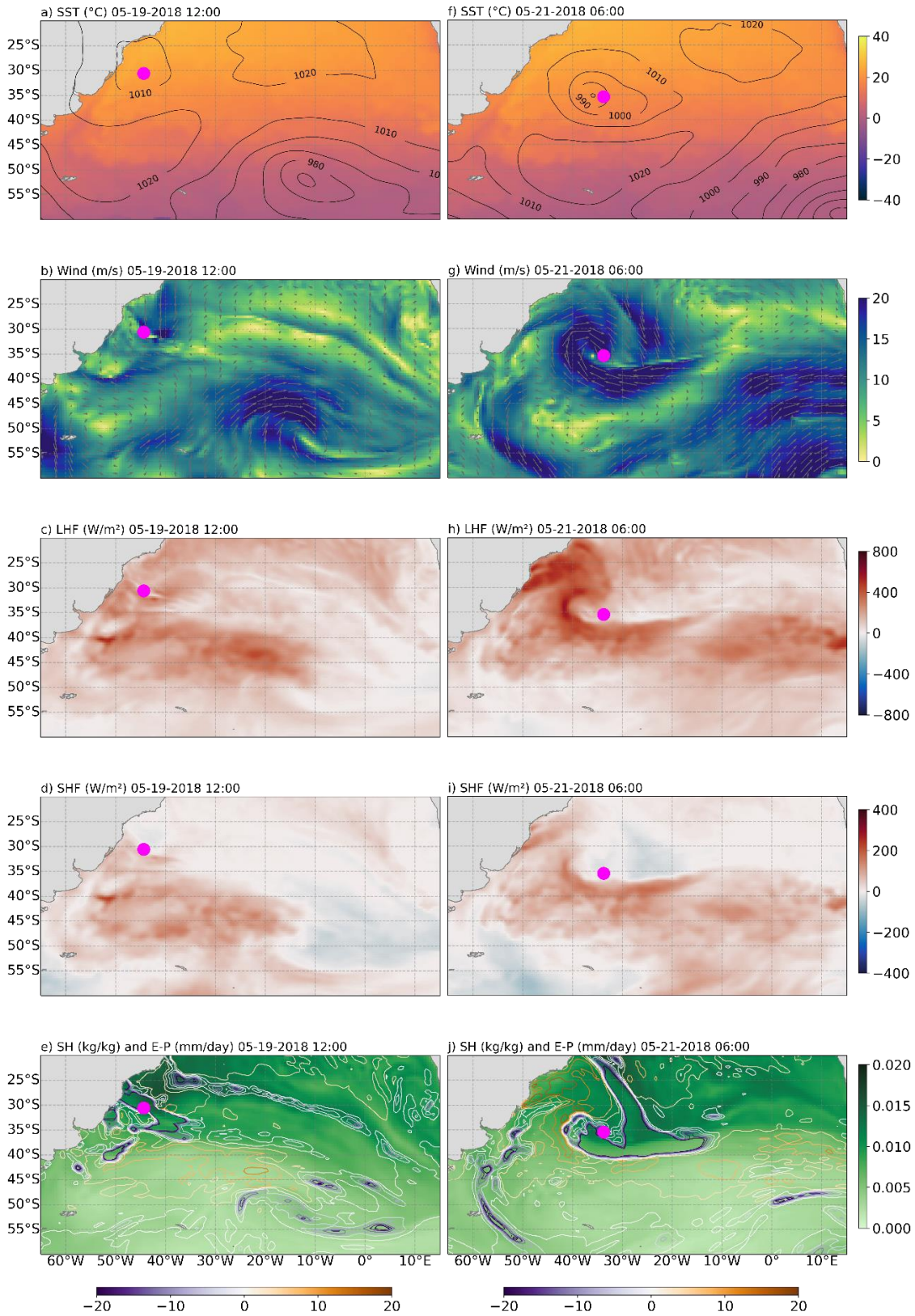


Figure 4.4: Extratropical cyclone case I1 at intensification on May 19 12:00 (a-e) and maturity on May 21 06:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat flux in W/m². e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.

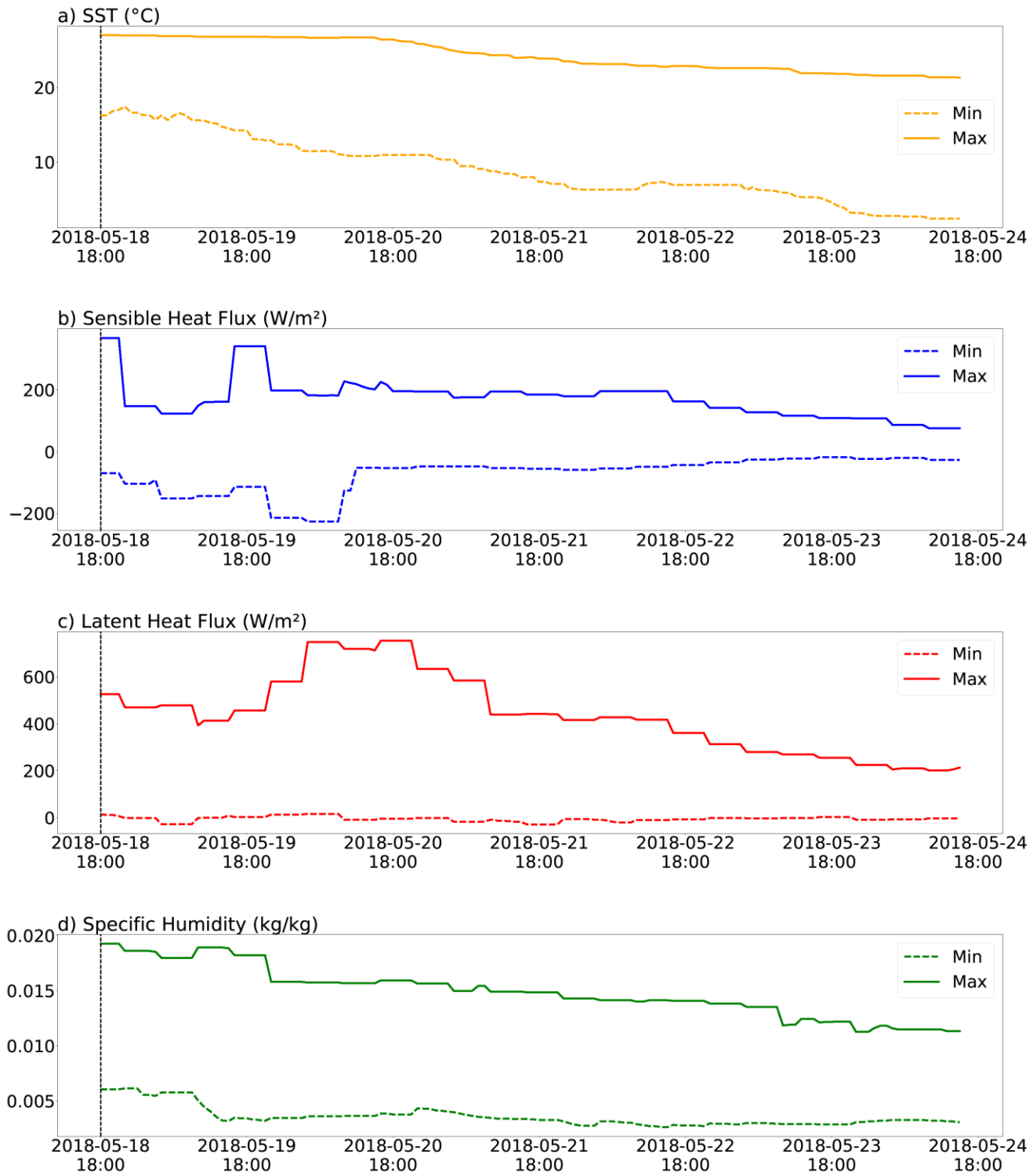


Figure 4.5: Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone I1 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST ($^{\circ}\text{C}$). b) Sensible heat flux (W/m^2). c) Latent heat flux (W/m^2). d) Specific

humidity (kg/kg). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

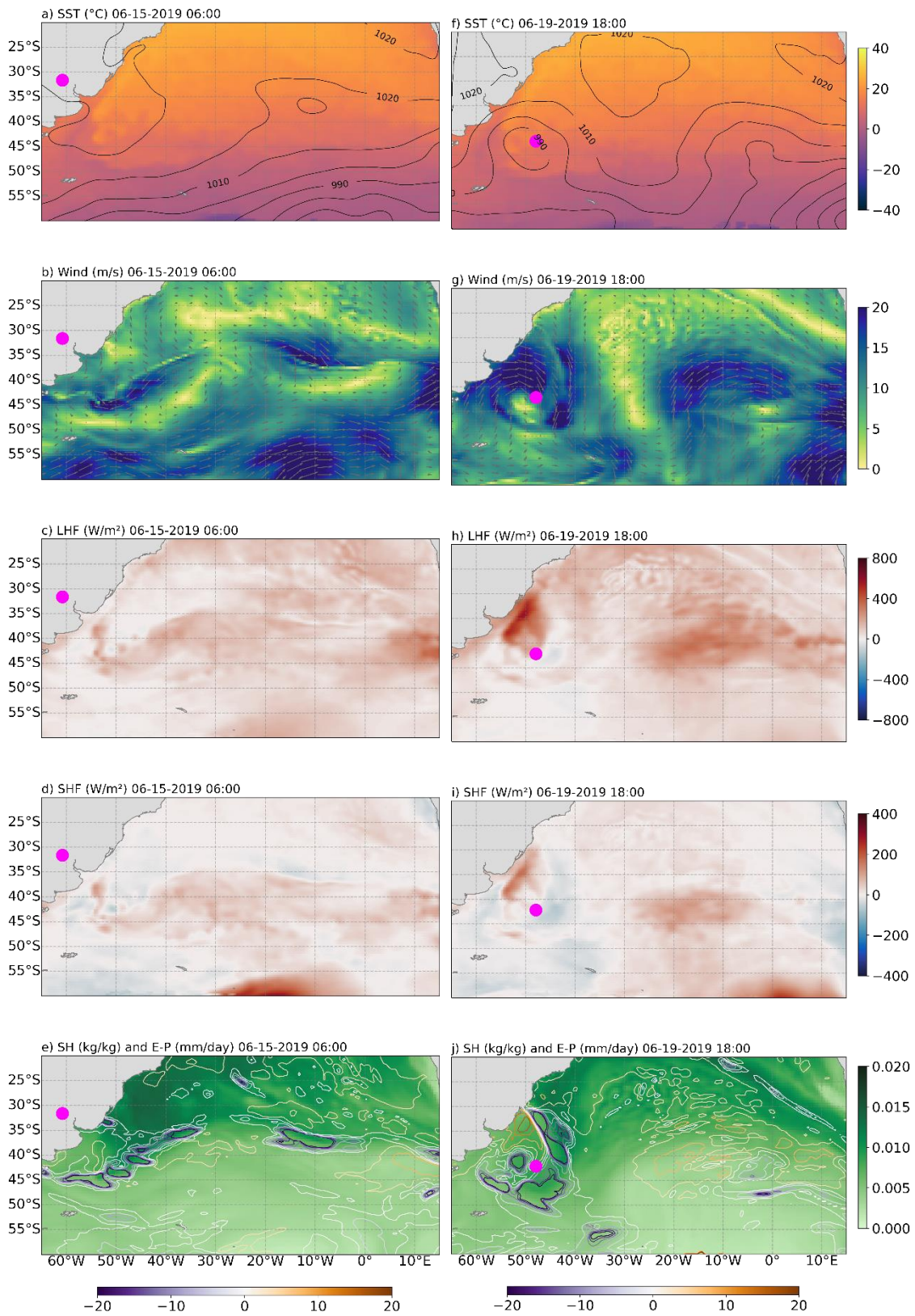


Figure 4.6: Extratropical cyclone case I2 at intensification on June 15 06:00 (a-e) and maturity on June 19 18:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat flux in W/m². e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.

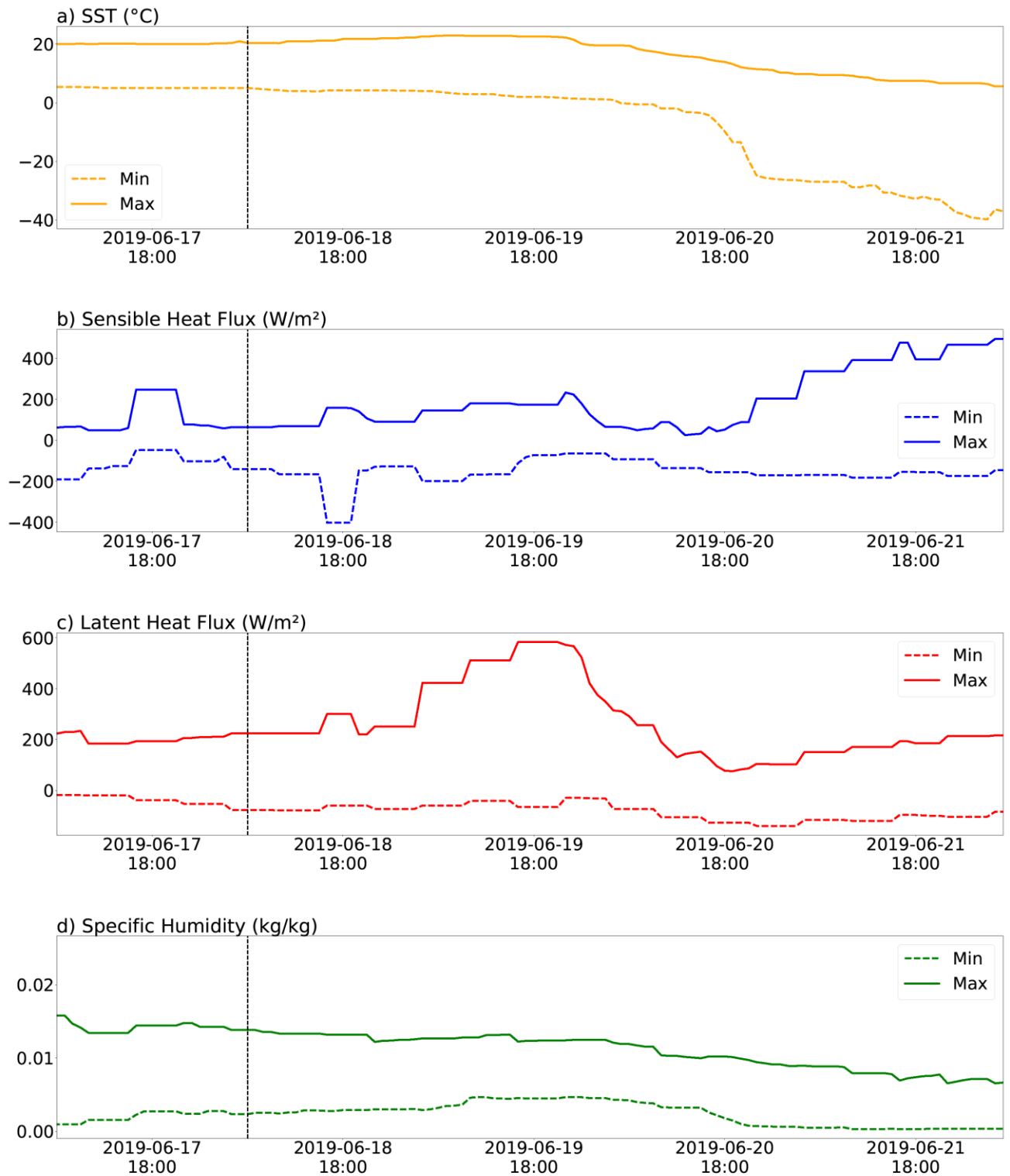


Figure 4.7: Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone I2 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d) Specific

humidity (kg/kg). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

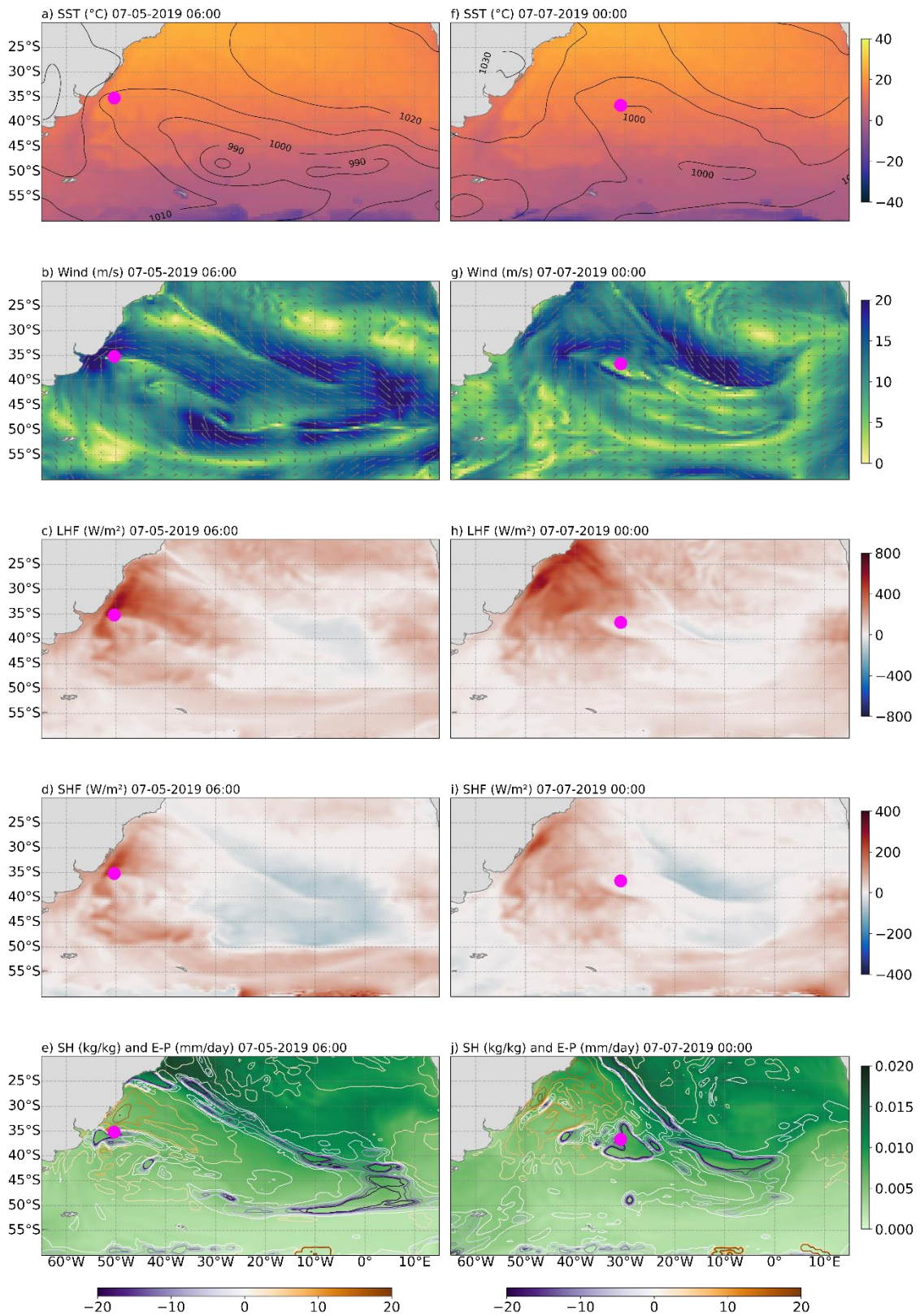


Figure 4.8: Extratropical cyclone case I3 at intensification on July 5 06:00 (a-e) and maturity on July 7 00:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed

in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m^2 . d, i) Sensible heat flux in W/m^2 . e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.

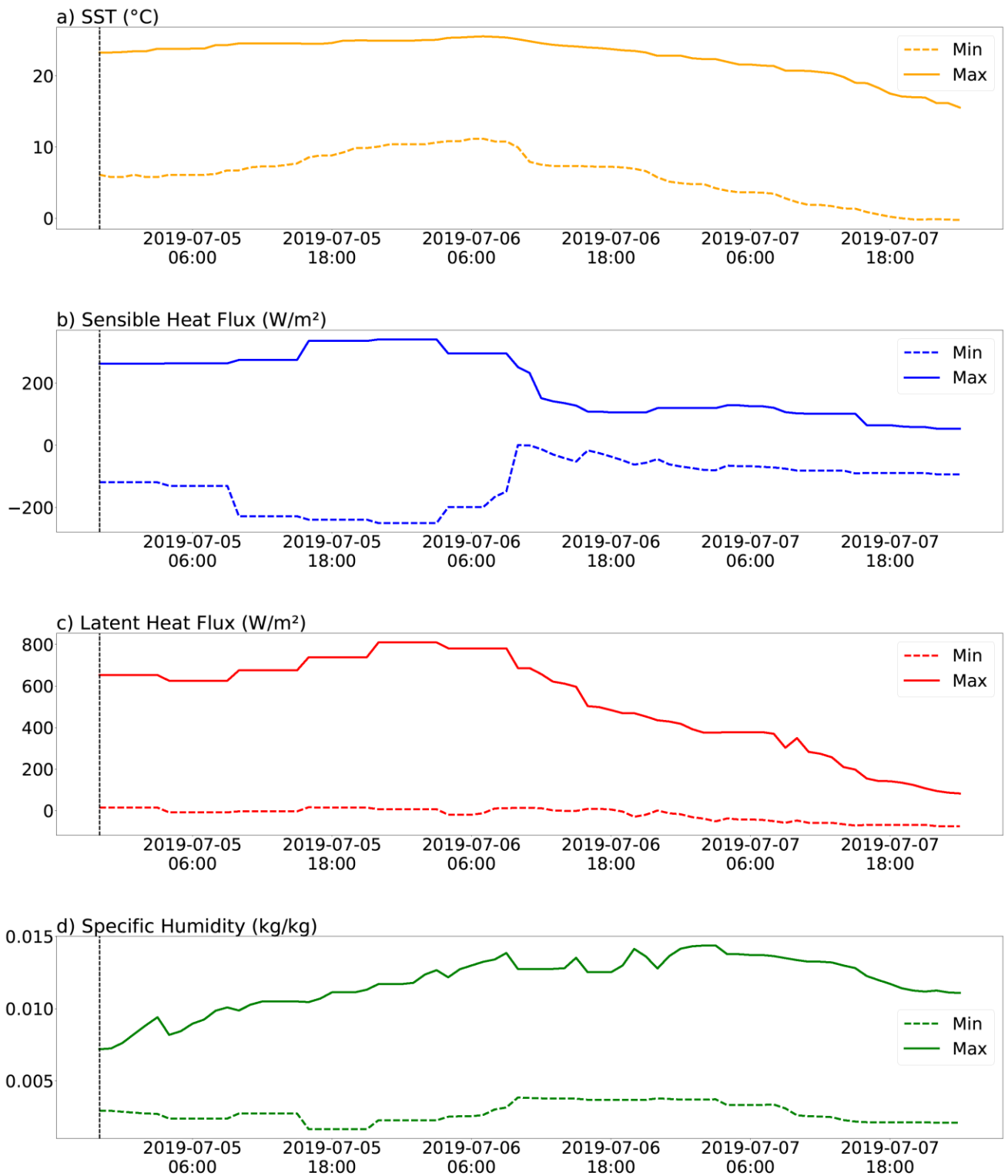


Figure 4.9: Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone I3 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST ($^{\circ}\text{C}$). b) Sensible heat flux (W/m^2). c) Latent heat flux (W/m^2). d) Specific

humidity (kg/kg). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

The analysis of the three bomb cyclones reveals that none of the cases exhibited elevated heat fluxes 24 hours before cyclogenesis, as observed in cases I1 and I3 (Fig. 4.10a-f). This indicates that ocean-to-atmosphere heat fluxes were not key drivers in the early stages of these cyclones. For B1 and B2, heat fluxes became significant only toward the late intensification phase and the onset of maturity (Fig. 4.11c-i; Fig. 4.13c-i). In B1, the transition to maturity showed a sharp rise in latent heat flux, crucial for fueling the cyclone's warm sector, with values exceeding 500 W/m^2 (Fig. 4.12c). Similarly, in B2, latent heat flux peaked at 800 W/m^2 (Fig. 4.14c), indicating a strong moisture transfer from ocean to atmosphere, sustaining the cyclone's energy during its maturity phase (Fig. 4.13h). These high latent heat fluxes were key to the cyclones' development as they crossed warmer waters. In B1, sensible heat flux reached its minimum during intensification, dropping to -300 W/m^2 (Fig. 4.12b), indicating significant cooling along the cold front and reinforcing the temperature gradient between warm and cold sectors.

Conversely, B2 experienced a peak in sensible heat flux, reaching up to 500 W/m^2 (Fig. 4.14b; Fig. 4.13i), reflecting intense heating in the warm sector. As both systems evolved, the evaporation-minus-precipitation rate weakened along with decreasing heat fluxes, highlighting the role of SST in cyclone dynamics. In B2, as seen in Fig. 4.13f, the cyclone passed over warm waters during intensification and maturity, aiding energy growth. Both cyclones eventually moved into cooler waters, which likely contributed to their weakening by reducing available energy. Specific humidity increased during the intensification phase of

both B1 and B2, providing moisture to the warm sector and promoting cyclone growth (Fig. 4.11e-j; Fig. 4.13e-j). In B1 (Fig. 4.11e, j) and B2 (Fig. 4.13j), specific humidity remained elevated during maturity, helping sustain cyclone intensity. However, as the systems transitioned to dissipation, specific humidity decreased (Fig. 4.12d; 4.14d), reflecting reduced moisture transport. The evaporation-minus-precipitation rate also declined in heat fluxes, particularly along the cold front, affecting precipitation patterns as the cyclones weakened. This underscores the critical influence of SST and moisture fluxes in the lifecycle of these cyclones, influencing their development, intensification, and eventual dissipation.

In B3, the SST pattern was consistent with other cases, providing a source of energy through heat and moisture transfer to the atmosphere, supporting cyclone's development (Fig. 4.15a, f). The warm waters, particularly during the intensification and maturity phases, helped sustain the cyclone's energy. Latent heat flux contributed to both the warm and cold sectors during these phases (Fig. 4.15c, h), playing a key role in transporting moisture from the ocean to the atmosphere and fueling cyclone growth, with values reaching 400 W/m^2 (Fig. 4.16c). Sensible heat flux values remained relatively neutral during the intensification phase (Fig. 4.15d), indicating that ocean-to-atmosphere heat transfer was not dominant at this stage. However, during maturity (Fig. 4.15i), sensible heat flux increased, particularly around the cyclone's center, reaching 400 W/m^2 (Fig. 4.16b), indicating that heat transfer became more significant as the cyclone matured. Negative values around the cold front indicated enhanced cooling. A peak in heat fluxes after the cyclogenesis, sensible heat at 600 and latent over 700 W/m^2 indicates that heat fluxes from the continent played a role

in the early stages of this system. The evaporation-minus-precipitation rate remained relatively stable throughout the cyclone's lifecycle, maintaining balance in moisture transfer (Fig. 4.15e, j). During intensification, the specific humidity contributed significantly to both warm and cold sectors (Fig. 4.16d; 4.15e, j), leading to further development of cyclones. Notably, the specific humidity remained high during the maturity, indicating a consistent availability of moisture, which was associated with steady precipitation throughout the cyclone's lifecycle.

As observed in all three bomb cyclones, there was a marked decrease in both sensible and latent heat fluxes during their dissipation phases. The heat fluxes weakened significantly, with negative values observed particularly along the warm fronts (Fig. 4.17a-f). This indicates a reduction in energy transfer from the ocean to the atmosphere. The latent heat fluxes show a substantial decrease across all three cyclones (Fig. 4.17a, c, e), highlighting reduced moisture transfer from the ocean. Similarly, sensible heat fluxes show a notable drop, with negative values reflecting surface cooling (Fig. 4.17b, d, f), contributing to the cyclone's dissipation. The decline in both fluxes across all three cases emphasize the critical role of heat and moisture exchanges in the weakening and dissipation of extratropical cyclones.

In summary, the results point out the significant influence of oceanic heat fluxes, SST and moisture in driving cyclone dynamics. These variables consistently provide essential energy, supporting cyclone intensification. During the dissipation phase, the marked decrease in heat fluxes emphasizes their importance in the weakening process of these systems. Together, these insights contribute to a deeper understanding of extratropical cyclone dynamics, particularly in the studied regions, demonstrating how energy and moisture

exchanges between ocean and atmosphere govern the development, maintenance, and eventual dissipation of these systems.

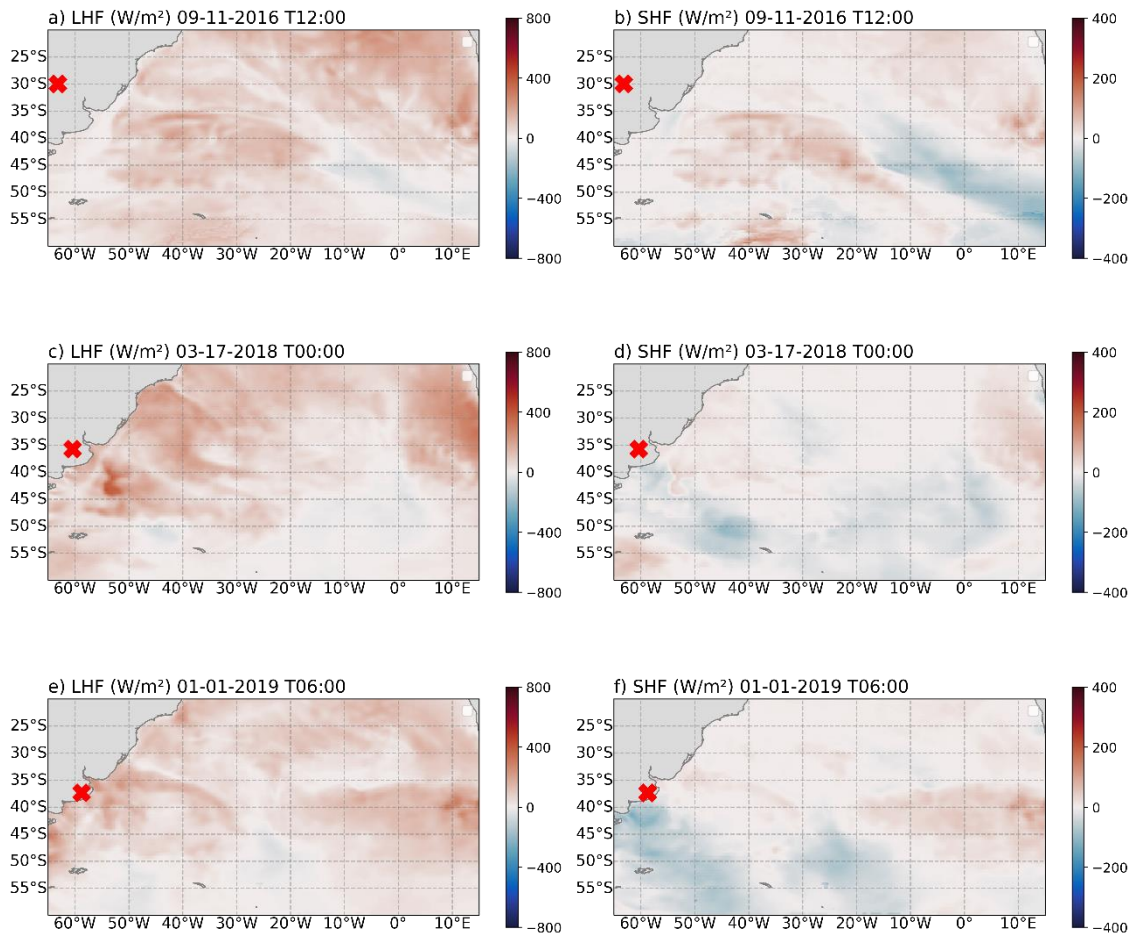


Figure 4.10: Approximately 24h before cyclogenesis for the bomb cases: B1 - September 11 12:00; B2 - March 17 00:00; B3 - January 01 06:00. a, c, e) Latent heat flux in W/m^2 . b, d, f) Sensible heat flux in W/m^2 . The “X” symbol represents the position of cyclogenesis for visual reference of the cyclone location.

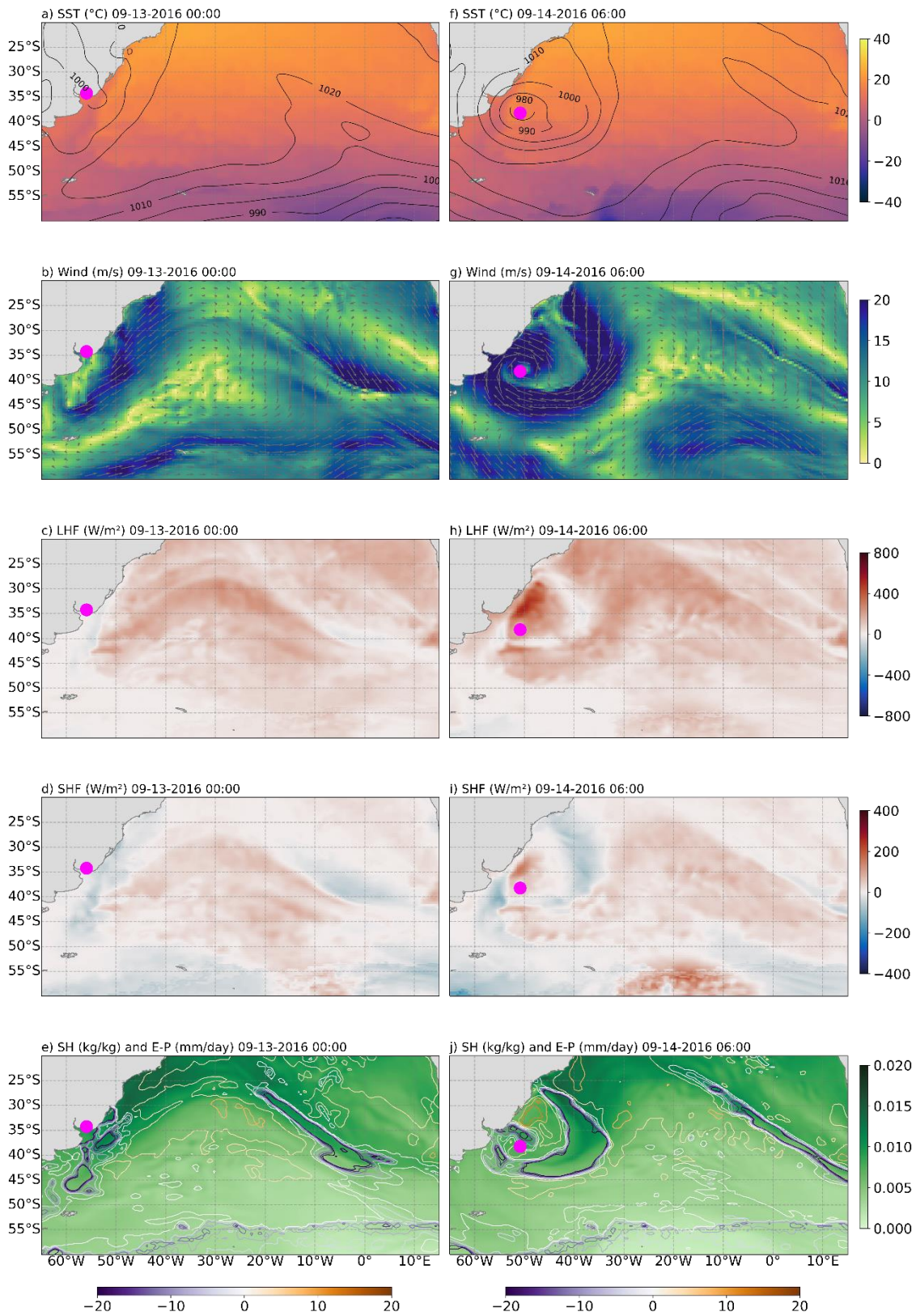


Figure 4.11: Extratropical cyclone case B1 at intensification on September 13 00:00 (a-e) and maturity on September 14 06:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat flux in W/m². e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.

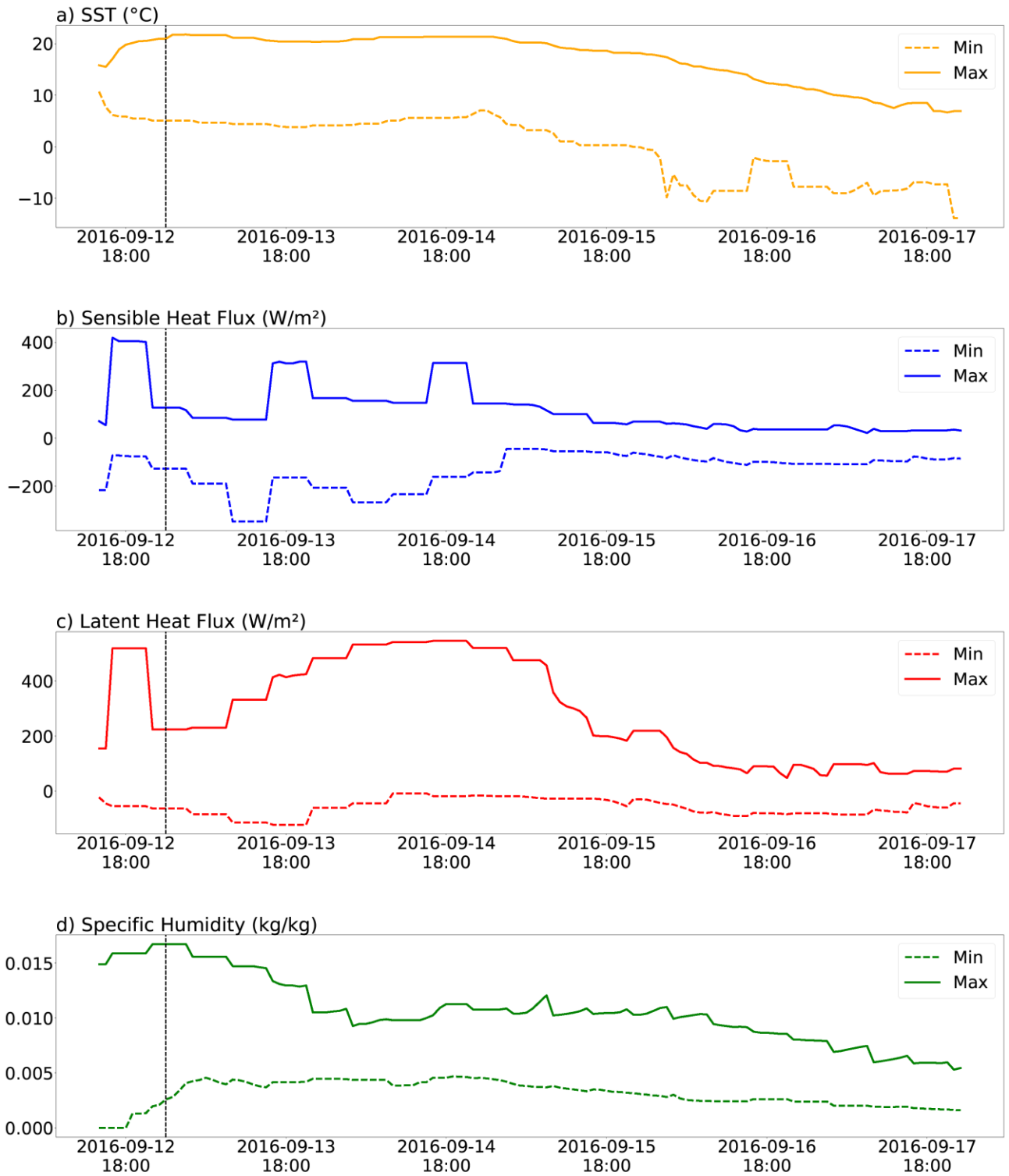


Figure 4.12: Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone B1 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d)

Specific humidity (kg/kg). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

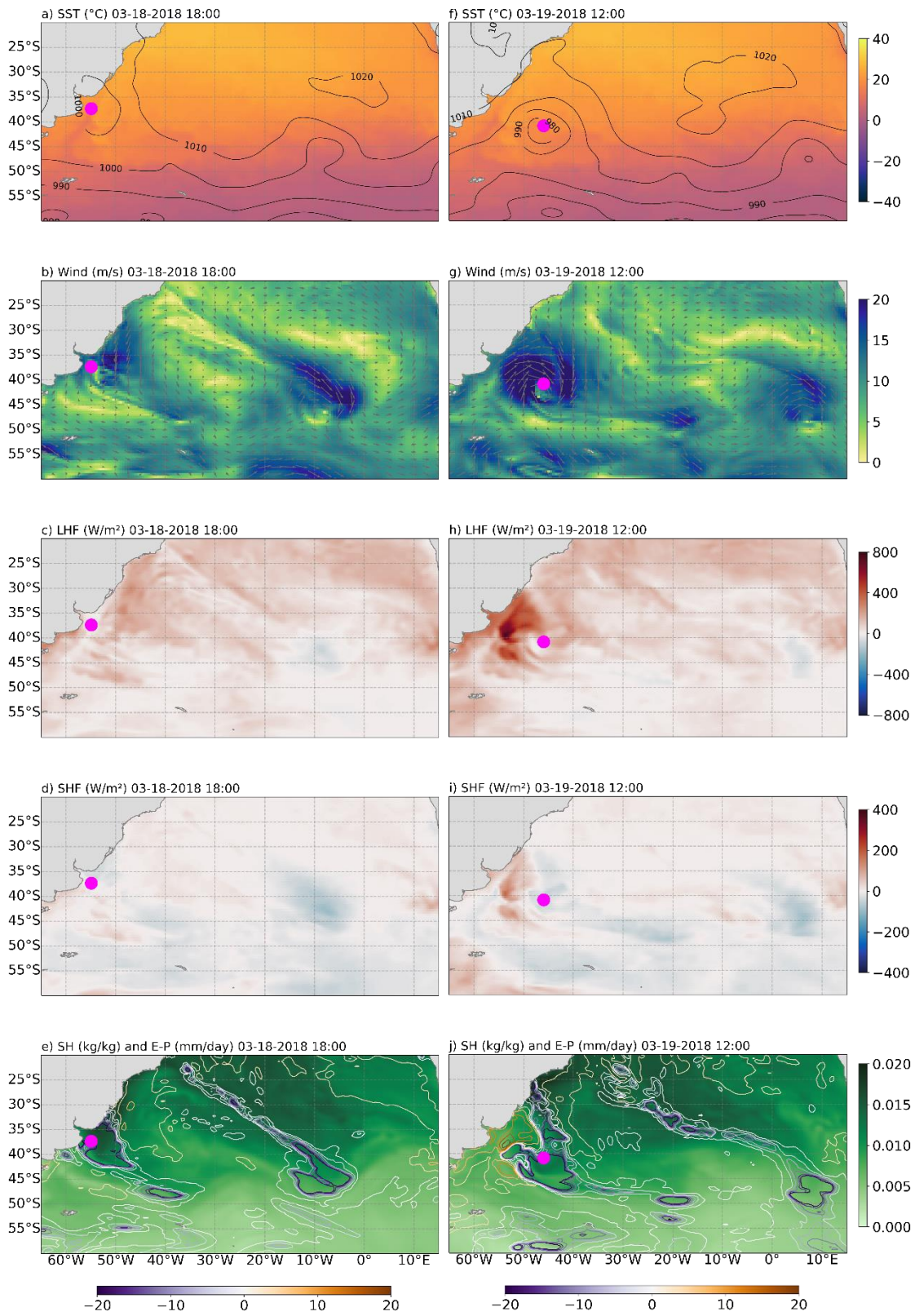


Figure 4.13: Extratropical cyclone case B2 at intensification on March 18 18:00 (a-e) and maturity on March 19 12:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind

speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m^2 . d, i) Sensible heat flux in W/m^2 . e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day. The magenta dot represents the center of the cyclone.

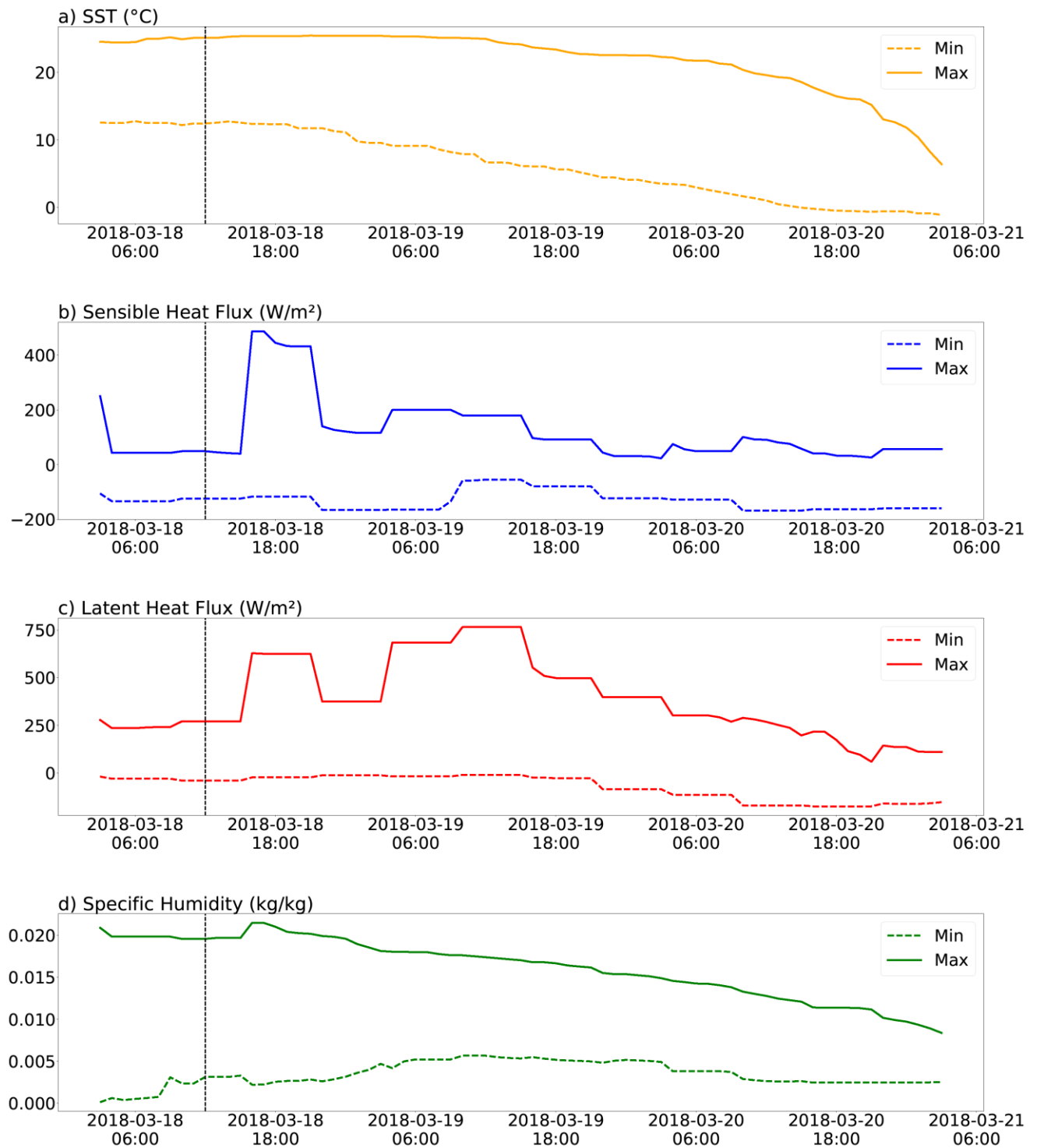


Figure 4.14: Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone B2 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d) Specific humidity (kg/kg). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

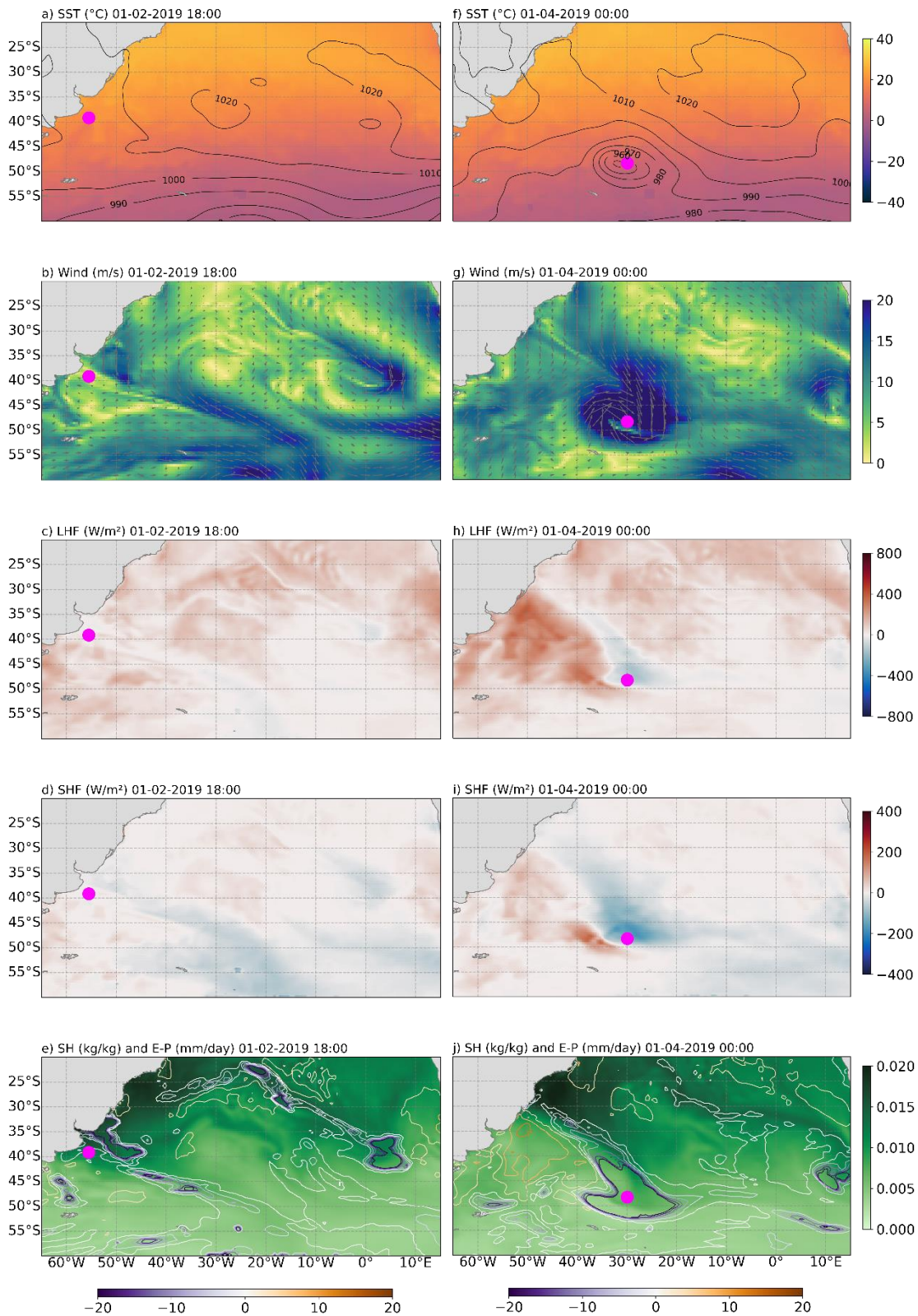


Figure 4.15: Extratropical cyclone case B3 at intensification on January 02 18:00 (a-e) and maturity on January 04 00:00 (f-j). a, f) Sea surface temperature in °C and pressure lines in hPa. b, g) Wind speed in m/s with direction vectors. c, h) Latent heat flux in W/m². d, i) Sensible heat

flux in W/m^2 . e, j) Specific humidity in kg/kg with lines of evaporation minus precipitation rate in mm/day . The magenta dot represents the center of the cyclone.

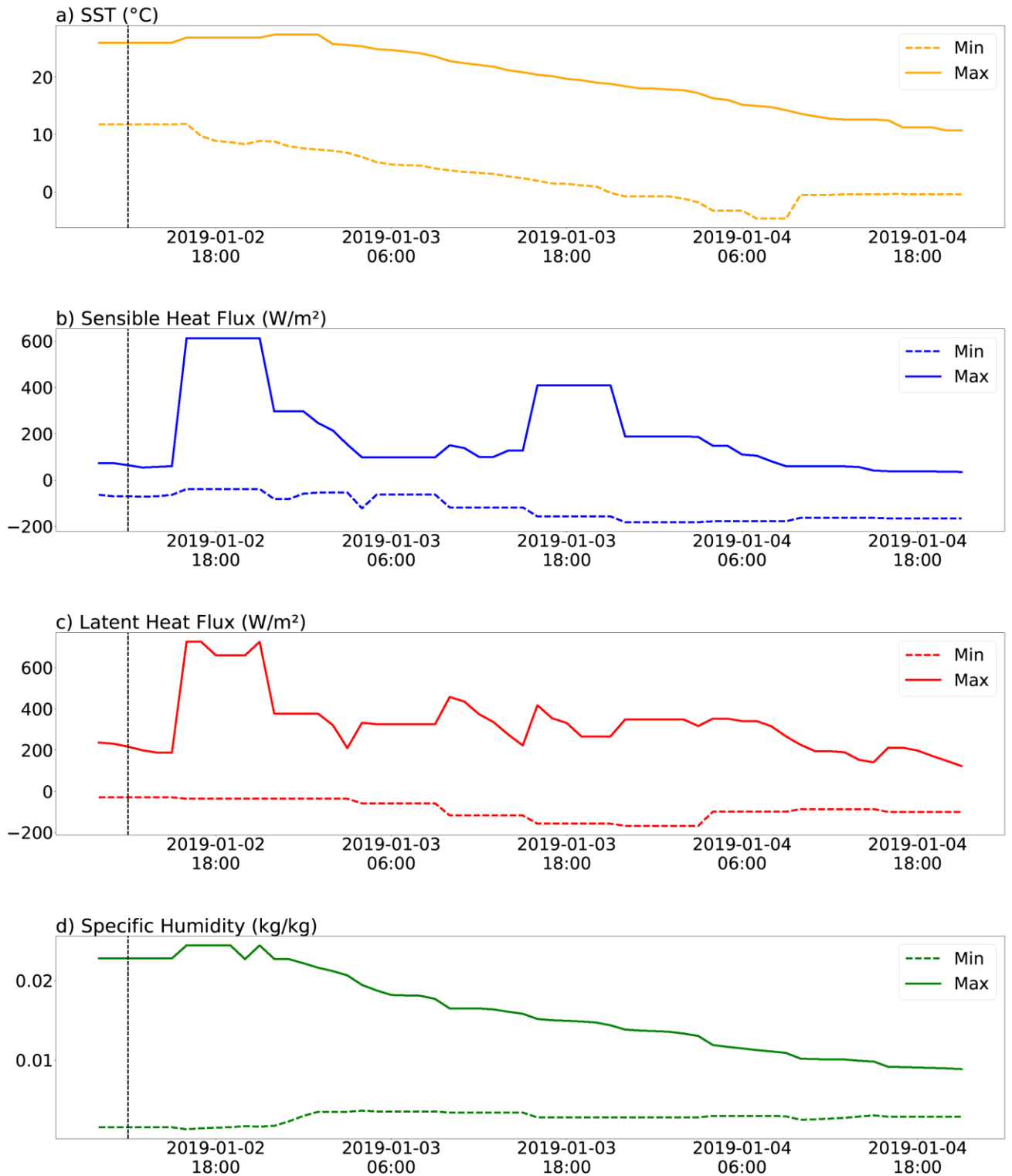


Figure 4.16: Time evolution of heat fluxes and specific humidity during the extratropical cyclone B3 lifecycle within 10° radius of cyclone center, showing maximum (solid line) and minimum (dashed line) values. a) SST (°C). b) Sensible heat flux (W/m²). c) Latent heat flux (W/m²). d) Specific humidity (kg/kg). The dotted line denote the instant where the cyclone moves from continent to ocean.

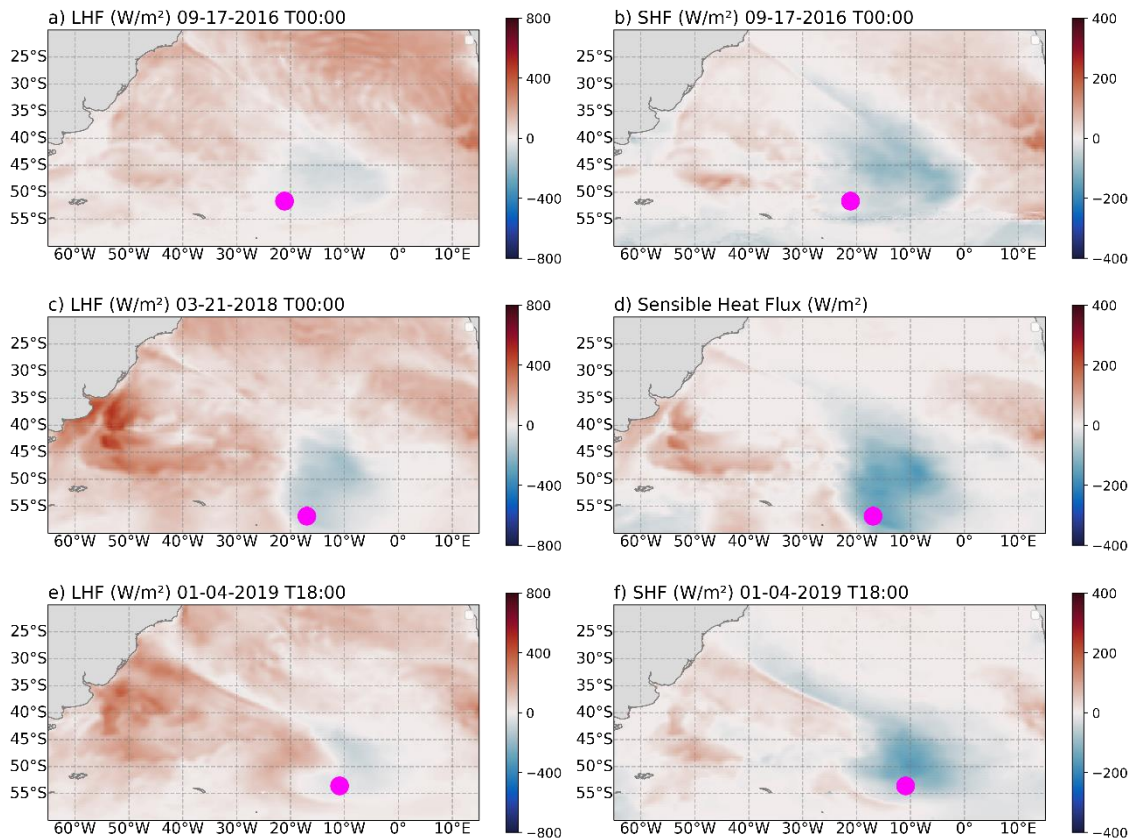


Figure 4.17: Extratropical cyclone cases B1(a-b), B2(c-d) and B3(e-f) at dissipation phase. a, c, e) Latent heat flux in W/m². b, d, f) Sensible heat flux in W/m². The magenta dot represents the center of the cyclone.

Our results reveal that intense and explosive cyclones present differences in their formation, intensification, and structure. Intense cyclones intensify gradually over an extended period, often showing less defined structures and multiple phases of increased activity. In contrast, explosive cyclones experience rapid intensification within a short time, characterized by distinct phases of significant

pressure drops. These systems typically exhibit more defined cold and warm fronts, with a stronger horizontal gradient in heat fluxes.

Examples such as I1 and I2 represent intense cyclones, characterized by longer formation periods and less pronounced structures. On the other hand, B2 and B3 exhibited rapid intensification and more defined structures. However, there is no consensus in the scientific community regarding the structural characteristics of explosive cyclones. For instance, B2 and B3 showed more occluded structures, while B1 had broader and expanded fronts.

Wind direction in explosive cyclones closely followed the configuration of fronts, reflecting the dynamic interaction between atmospheric processes and cyclone development. Overall, the distinction between intense and explosive cyclones provides valuable insights into the diverse dynamics of these extreme weather events.

4.4 Discussion

In all analyzed cases, latent and sensible heat fluxes were essential in influencing cyclone dynamics, though their impact varied depending on the lifecycle phase. Contrary to expectations, heat fluxes were not the primary drivers in the early stages of cyclogenesis for the bomb cases and I2, where significant heat fluxes only occurred after cyclogenesis, when the cyclone passes from the continent to the ocean. This suggests the genesis of these systems are more related to dynamical processes. In fact, previous studies have shown that cyclogenesis in South America, even over the ocean, despite being strengthened by low-level

processes, relies on upper-level mechanisms (e.g., Gramscianinov et al., 2019; Crespo et al., 2020). For instance, upper-level divergence triggers the low-level perturbation, as expected on a baroclinic wave. The exception is B3, where continental heat fluxes indicated a notable influence on the cyclone's early development. In cases I1 and I3, cyclogenesis occurred over the ocean, with notable heat fluxes observed prior to their formation. This indicates that the warm ocean surface contributed essential moisture and energy, facilitating the early stages of cyclone development and intensification. The pre-existing heat fluxes played a critical role in modulating the cyclones' subsequent evolution.

During the intensification phase, latent heat flux peaked in all cases, particularly I1, I2, and I3, exceeding 600 W/m^2 . This indicates that the transfer of moisture from the ocean to the atmosphere is essential in fueling cyclone development. The increased moisture supported convection and cloud formation, driving the release of latent heat and deepening the cyclone wave at low level (Hirata et al., 2015; Hirata et al., 2019; Bui & Spengler, 2021). The results confirm that moisture transport, especially through the warm sector, played a critical role in the intensification phase, aligning with previous studies on the contribution of latent heat in cyclone dynamics.

The Brazil Current, which flows along the southeastern coast of South America, consistently provided a source of heat and moisture for the cyclones analyzed in this study. In both I1 and I2, the interaction between the cyclones and warm ocean waters was a major factor in maintaining high latent heat fluxes during the intensification and maturity phases. Latent heat fluxes exceeded 800 W/m^2 during intensification, highlighting the warm current's contribution to moisture transfer from the ocean to the atmosphere, which in turn fueled convection and cloud

formation. This heat transfer process is consistent with the findings of Hirata (2019), emphasizing the role of warm ocean currents in transporting moisture to cyclone centers, enhancing latent heating and driving cyclone intensification.

As observed in B1, B2, and B3, interactions with warm waters from the Brazil Current were essential in sustaining these systems during their rapid intensification phases. In B2, latent heat flux reached 800 W/m^2 , coinciding with the cyclone's transition into its mature phase. This peak reflected an efficient transfer of moisture from the warm ocean waters to the atmosphere, fueling the explosive intensification observed. The interaction between the Brazil Current and the Brazil-Malvinas Confluence generated favorable conditions for energy exchange by creating a pronounced SST gradient as showed in Figures 4.5a, 4.7a, 4.9a, 4.12a, 4.14a and 4.16a, such was also suggested by Hirata et al. (2015) in their study of rapid cyclone intensification driven by oceanic heat fluxes.

Sensible heat flux also contributed to the intensification, particularly by influencing the temperature gradients across the cyclone's warm and cold fronts. The study shows how the highest positive values of sensible heat flux occurred at the warm front, while negative values dominated the cold front, reinforcing the temperature contrasts that structure cyclones. In I1, I2, and I3, sensible heat fluxes reached extremes of 350 W/m^2 and -200 W/m^2 during the intensification and maturity phases, respectively, which emphasize the role of heat exchange in maintaining cyclone intensity and corroborate the results found by Kuo et al. (1991), working on cyclone deepening.

The analysis of B2 and B3 highlighted rapid intensification within a short time, with B3 exhibiting a 52 hPa drop in central pressure within 24 hours. In both

cases, latent heat fluxes exceeded 800 W/m^2 , driving the sharp pressure drops and rapid energy buildup. This rapid intensification corroborates Bui and Spengler (2021), who emphasized the role of SST distribution near cyclone centers in accelerating deepening rates. The rapid intensification observed in B2 and B3 contrasts with the gradual intensification observed in I1 and I2, highlighting distinct differences in cyclone behaviors. This supports the classification of B2 and B3 as explosive cyclones, characterized by more defined frontal structures and intense latent heat fluxes, while I1 and I2 followed a more gradual, yet still powerful, development path.

During the maturity phase, interactions with warm ocean waters and elevated specific humidity in the warm sector sustained the cyclones' strength. High specific humidity in I1 and I3, maintained moisture availability for continued convection, reinforcing the latent heat release necessary for the cyclone's energy. The evaporation-minus-precipitation rate, combined with specific humidity, further supports the importance of moisture fluxes in sustaining cyclone activity, particularly along the cold front, where moisture transport from the ocean persisted. The results show a reduction in humidity occurred as the cyclones moved away from the warm currents. This decreasing specific humidity weakened the cyclones, as less latent heat was available to fuel convection. The findings corroborate Vera et al. (2002), who noted the significance of latent heat fluxes in maintaining cyclone intensity and highlighted that a lack of these fluxes, particularly over cooler waters, leads to a marked decline in intensification rates. This pattern was observed in all the cases studied. Hirata et al. (2015) also emphasized the importance of warm ocean currents in maintaining high moisture levels in cyclones, particularly through the warm conveyor belt.

During the dissipation phase, all cyclones exhibited marked declines in both latent and sensible heat fluxes, indicating a reduction in energy transfer from the ocean. This consistent weakening of heat fluxes, particularly along the cold front, highlights the role of SST and moisture exchanges in governing cyclone dissipation. As SST decreased and sensible heat fluxes turned negative, cooling effects began to dominate, leading to the gradual weakening of the systems. This decline in heat and moisture fluxes is key to understanding the de-intensification process in extratropical cyclones, as previously suggested by Hirata et al. (2019).

Case B3, recognized as the most intense cyclone in a decade (Andrade et al. 2022), was characterized by rapid intensification and significant coastal impacts. Ocean heat fluxes became relevant six hours after cyclogenesis, with increased surface winds in the cold sector. Despite negative latent and sensible heat fluxes in the warm sector, the cyclone maintained its intensity due to moisture supplied from the southern region of the cyclone center, where the heat fluxes remained elevated, as suggested by Hirata et al. (2018). This additional moisture likely played a crucial role in the diabatic heating process within the cyclone's warm conveyor belt, further contributing to its intensification.

4.5 Conclusion

The primary objective of this study was to investigate the role of latent and sensible heat fluxes in the development, intensification, and dissipation of extratropical cyclones over the South Atlantic. By analyzing multiple cases (I1, I2, I3, B1, B2, and B3), this work analyzed the interactions between these cyclones

and oceanic features such as the Brazil-Malvinas Confluence, as well as how these interactions contribute to the lifecycle of cyclones.

The results demonstrate that surface latent heat fluxes associated with warm SSTs were fundamental in the baroclinic development of the cyclones, playing a critical role in their intensification by driving the transfer of moisture from the ocean to the atmosphere, which in turn fueled convection, cloud formation, and creates a feedback loop that leads to the release of more latent heat. In contrast, sensible heat fluxes played a secondary role, primarily contributing to the deepening rate of the cyclones by influencing the temperature gradient between the warm and cold fronts. This was particularly evident during the intensification and maturity phases, where temperature contrasts helped maintain cyclone structure.

The analysis of cyclone dynamics reveals distinct temporal and spatial variability across different cases. Each cyclone exhibited unique patterns in its formation, intensification, and dissipation, providing insights into the diverse dynamics of these meteorological phenomena. Rapid intensification was observed in cases like B2 and B3, where extreme latent heat flux values coincided with sharp pressure drops, illustrating how explosive cyclones can develop under favorable conditions. These findings highlight the critical importance of understanding the role of oceanic heat fluxes and specific humidity in shaping cyclone dynamics. The interaction with warm water currents, particularly the Brazil Current, provided the energy necessary for cyclone growth, while the reduction in heat fluxes as the cyclones moved away from these warm waters marked the onset of their dissipation.

To advance forecasting capabilities and improve our understanding of extratropical cyclones, it is essential to integrate observational, numerical, and theoretical analyses. This integration can improve early warning systems and lead to more effective mitigation strategies. These findings contribute to the broader effort of improving cyclone forecasts, which is crucial for preparing for and mitigating the impacts of these powerful meteorological phenomena on coastal communities and infrastructure. A comprehensive understanding of these processes will enable enhance preparedness and response strategies, reducing the risks associated with extratropical cyclones in the South Atlantic region.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Laboratory of Dynamical and Satellite Oceanography (LODS) and the Graduate Program in Oceanology (PPGO) at the Institute of Oceanography, Federal University of Rio Grande (FURG). We are grateful for the institutional support provided by FURG and the resources made available by LODS. Special thanks to CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) for the funding and scholarships that made this research possible.

REFERENCES

Referências Bibliográficas no Capítulo VII deste documento.

Capítulo V: Síntese da Discussão e Conclusão

A análise dos seis casos de ciclones extratropicais na América do Sul destacou a complexidade desses fenômenos, evidenciando o papel dos fluxos de calor latente e sensível e a influência da Corrente do Brasil na formação e intensificação dos ciclones. Nos estágios iniciais da ciclogênese, os fluxos de calor não foram principais impulsionadores em casos como I2, formados sobre o continente. Em contrapartida, casos com ciclogênese sobre o oceano (I1 e I3)

mostraram fluxos intensos 24 horas antes da sua formação, indicando que esses fluxos oceânicos criaram condições favoráveis. O caso B3, por sua vez, teve seu desenvolvimento influenciado por fluxos de calor continentais, enquanto I1 e I2 beneficiaram-se de fluxos contínuos de umidade e calor para a intensificação prolongada.

Durante a fase de intensificação, os fluxos de calor latente atingiram picos significativos, nos casos intensos com valores acima de 600 W/m^2 , sustentando a convecção e a formação de nuvens. O transporte de umidade do oceano para a atmosfera foi fundamental com a Corrente do Brasil fornecendo calor e umidade essenciais para a formação de sistemas de baixa pressão [Hirata et al., 2015, 2019; Bui & Spengler, 2021]. A interação com águas quentes em I1 e I2 manteve altos fluxos de calor latente durante a maturidade, alcançando até 800 W/m^2 , demonstrando a importância das águas aquecidas da Corrente do Brasil para a manutenção dos ciclones.

Nos ciclones B1, B2 e B3, a interação com águas quentes foi crucial, especialmente em B2, onde o fluxo de calor latente atingiu 800 W/m^2 na transição para a fase madura, facilitando seu desenvolvimento explosivo. A rápida intensificação desses ciclones foi associada ao feedback positivo CCB-LH (*Current Contour Boundary-Latent Heat*) [Hirata et al., 2015]. Fluxos de calor sensível influenciaram os gradientes térmicos, com extremos de até 350 W/m^2 e -200 W/m^2 em I1, I2 e I3, reforçando a importância dos gradientes de temperatura no aprofundamento dos ciclones [Kuo et al., 1991].

Durante a fase de dissipação, todos os ciclones apresentaram declínios acentuados nos fluxos de calor, sinalizando uma diminuição na transferência de

energia oceânica. A redução dos fluxos, especialmente na frente fria, indicou que a diminuição da TSM e o declínio do fluxo de calor sensível levaram ao enfraquecimento dos sistemas [Hirata et al., 2019]. O caso B3, o mais intenso em uma década [Andrade et al., 2022], ilustrou a complexidade das interações atmosféricas e oceânicas, com a continuidade da intensidade do ciclone sustentada pela umidade proveniente do sul do centro do ciclone mesmo durante o resfriamento da frente quente [Hirata et al., 2018].

Os resultados demonstram que os fluxos de calor latente, associados à temperatura da superfície do mar (TSM), foram fundamentais para o desenvolvimento baroclínico dos ciclones, impulsionando a transferência de umidade do oceano para a atmosfera, alimentando a convecção, a formação de nuvens e criando um feedback em loop da liberação de calor latente. Em contraste, os fluxos de calor sensível desempenharam um papel secundário, contribuindo principalmente para o aprofundamento dos ciclones ao influenciar o gradiente de temperatura entre as frentes quente e fria, particularmente nas fases de intensificação e maturidade.

Esses achados ressaltam a relevância dos fluxos de calor oceânicos para o ciclo de vida dos ciclones extratropicais e como mudanças nesses fluxos influenciam sua formação, intensificação e dissipação. O principal objetivo deste estudo foi investigar o papel dos fluxos de calor e umidade oceânicos no desenvolvimento, intensificação e dissipação de ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Ao analisar múltiplos casos, buscou-se explorar as interações entre esses ciclones e características oceânicas, como a Corrente do Brasil e a Confluência Brasil-Malvinas, além de compreender como essas interações influenciam o ciclo de vida dos ciclones.

Adicionalmente, a variabilidade temporal e espacial dos ciclones extratropicais requer um estudo aprofundado para entender melhor seus padrões de formação e dissipação ao longo do tempo. Mudanças climáticas e o aquecimento global podem influenciar a frequência, intensidade e trajetória desses ciclones. Estudos indicam que, enquanto a densidade anual de ciclones em latitudes médias pode diminuir, a intensidade e a extensão das áreas afetadas por precipitações associadas aos ciclones tendem a aumentar [Reboita et al., 2020]. Compreender essas tendências é fundamental para desenvolver estratégias de adaptação eficazes para as comunidades afetadas.

Para melhorar as previsões e estratégias de mitigação, é essencial considerar não apenas os fluxos de calor diretamente associados à TSM, mas também os efeitos indiretos desses fluxos na umidade atmosférica e no desenvolvimento dos ciclones. O entendimento dessas influências indiretas é crucial para aprimorar os modelos preditivos e assegurar respostas mais eficazes a eventos meteorológicos extremos.

As perspectivas futuras para a pesquisa de ciclones extratropicais envolvem o aprimoramento dos modelos preditivos por meio da integração de dados de alta resolução sobre fluxos de calor e umidade oceânicos e avanços em modelagem numérica que simulem com precisão a interação entre atmosfera e oceano. Além disso, a colaboração internacional e interdisciplinar será essencial para compartilhar dados e metodologias, acelerando o progresso na compreensão desses sistemas complexos e melhorando a capacidade global de resposta a eventos meteorológicos extremos. Ao abordar essas áreas de pesquisa e desenvolvimento, será possível prever e mitigar de forma mais eficaz os

impactos dos ciclones extratropicais, protegendo melhor as comunidades e ecossistemas afetados por esses fenômenos meteorológicos.

Capítulo VI: Referências

Bibliográficas

Andrade, H. N., Nunes, A. B., & Alves, R. D. C. M. (2022). Analysis of the most intense explosive cyclone that occurred between 2010 and 2020 in the South Atlantic. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(6), 2781-2795.

Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., & Cardoso, C. D. S. (2013). Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28, 43-56.

Bjerknes, J. (1919). On the structure of moving cyclones. *Monthly Weather Review*, 47(2), 95-99.

Bjerknes, J., & Solberg, H. (1922). Life cycle of cyclones and the polar front theory

of atmospheric circulation. *Geofysiske Publikasjoner*, 3(1), 1-18.

Bui, H., & Spengler, T. (2021). On the influence of sea surface temperature distributions on the development of extratropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78(4), 1173-1188.

Crespo, N. M., da Rocha, R. P., & de Jesus, E. M. (2020). Cyclones density and characteristics in different reanalyses dataset over South America. *EGU2020: Sharing Geoscience Online*, 4-8.

Emanuel, K. A., David Neelin, J., & Bretherton, C. S. (1994). On large-scale circulations in convecting atmospheres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120(519), 1111-1143.

Gan, M. A., & Rao, V. B. (1991). Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119(5), 1293-1302.

Gan, M. A., & Rao, V. B. (1994). The influence of the Andes Cordillera on transient disturbances. *Monthly Weather Review*, 122(6), 1141-1157.

Gozzo, L. F., & Rocha, R. P. D. (2013). Air–sea interaction processes influencing the development of a Shapiro–Keyser type cyclone over the subtropical South Atlantic Ocean. *Pure and Applied Geophysics*, 170(5), 917-934.

Gramscianinov, C. B., Hodges, K. I., & Camargo, R. D. (2019). The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. *Climate Dynamics*, 53(7), 4115-4140.

Gramscianinov, C. B., Campos, R. M., de Camargo, R., Hodges, K. I., Soares, C. G., & da Silva Dias, P. L. (2020a). Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases. *Ocean Engineering*, 216, 108111.

Gramscianinov, C. B., Campos, R. M., de Camargo, R., Hodges, K. I., Soares, C. G., & da Silva Dias, P. L. (2020b). Atlantic extratropical cyclone tracks in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases, *Mendeley Data*, V4. <https://doi.org/10.17632/kwcvfr52hp.4>

Gramscianinov, C. B., Campos, R. M., de Camargo, R., & Guedes Soares, C. (2021). Relation between cyclone evolution and fetch associated with extreme wave events in the South Atlantic Ocean. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 143(1), 1-9.

Gramscianinov, C. B., Campos, R. M., & Camargo, R. (2022). Climate change perspectives of the cyclones and oceanic hazards in the western South Atlantic Ocean. *Arquivos de Ciências do Mar* 55, 141–162. <https://doi.org/10.32360/acmar.v55iespecial.78186>

Gramscianinov, C. B., Staneva, J., de Camargo, R., & da Silva Dias, P. L. (2023). Changes in extreme wave events in the southwestern South Atlantic Ocean. *Ocean Dynamics*, 73(11), 663-678.

Hart, R. E. (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly weather review*, 131(4), 585-616.

Hartmann, D. L. (2015). *Global Physical Climatology* (2nd ed.). Elsevier Academic Press.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

Hirata, H., Kawamura, R., Kato, M., & Shinoda, T. (2015). Influential role of moisture supply from the Kuroshio/Kuroshio Extension in the rapid development of an extratropical cyclone. *Monthly Weather Review*, 143(10), 4126-4144.

Hirata, H., Kawamura, R., Kato, M., & Shinoda, T. (2018). A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension. *Monthly Weather Review*, 146(2), 417-433.

Hirata, H., Kawamura, R., Yoshioka, M. K., Nonaka, M., & Tsuboki, K. (2019). Key role of the Kuroshio Current in the formation of frontal structure of an extratropical cyclone associated with heavy precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(12), 6143-6156.

- Hodges, K. I. (1994). A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Monthly Weather Review*, 122(11), 2573-2586.
- Hodges, K. I. (1995). Feature tracking on the unit sphere. *Monthly Weather Review*, 123(12), 3458-3465.
- Hodges, K. I. (1999). Adaptive constraints for feature tracking. *Monthly Weather Review*, 127(6), 1362-1373.
- Holton, J. R., Hakim, G. J. (2013). An Introduction to Dynamic Meteorology. *Academic Press*. Vol. 88.
- Hoskins, B. J., & Hodges, K. I. (2005). A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, 18(20), 4108-4129.
- Kuo, Y. H., Low-Nam, S., & Reed, R. J. (1991). Effects of surface energy fluxes during the early development and rapid intensification stages of seven explosive cyclones in the western Atlantic. *Monthly Weather Review*, 119(2), 457-476.
- Lackmann, G. M. (2011). Midlatitude Synoptic Meteorology: Dynamics, Analysis, and Forecasting. *American Meteorological Society*.
- Machado, J. P., Miranda, G. S. B., & Gozzo, L. F. (2019). Condições Atmosféricas Associadas a Eventos de Ressaca no Litoral Sul e do Sudeste do Brasil Durante o El Niño 2015/2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 529-544.
- Matano, R. P., Palma, E. D., & Piola, A. R. (2010). The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. *Ocean Science*, 6(4), 983-995.
- Nunes, L. H., Greco, R., & Marengo, J. A. (2018). Climate change in Santos Brazil: Projections, impacts and adaptation options. In *Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options* (pp. 1-10). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96535-2>
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). *Physics of climate*. American Institute of Physics.

Piva, E. D., Moscati, M. C. D. L., & Gan, M. A. (2008). Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23, 450-476.

Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., & Ambrizzi, T. (2005). Climatologia de Ciclones sobre o Atlântico Sul Utilizando Métodos Objetivos na Detecção destes Sistemas. In *IX CONGREGMET*, Buenos Aires, Argentina, Outubro 3-7, 2005.

Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., & Sugahara, S. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35(7), 1331-1347.

Reboita, M. S., Gan, M. A., Da Rocha, R. P., & Custódio, I. S. (2017). Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte I—revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 171-186.

Reboita, M. S., Reale, M., Da Rocha, R. P., Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., & Cavazos, T. (2020). Future changes in the wintertime cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach. *Climate Dynamics*, 57(5), 1533-1549.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., & Goldberg, M. (2014). The NCEP climate forecast reanalysis version 2. *Journal of Climate*, 27, 2185-2208.

Sanders, F., & Gyakum, J. R. (1980). Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. *Monthly Weather Review*, 108(10), 1589-1606.

Schossler, V., Aquino, F. E., Reis, P. A., & Simões, J. C. (2020). Antarctic atmospheric circulation anomalies and explosive cyclogenesis in the spring of 2016. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03200-9>

Schultz, D. M., & Wernli, H. (2001). Determining Midlatitude Cyclone Structure

and Evolution from the Upper-Level Flow. *Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies*. Retrieved.

Shapiro, M., & Keyser, D. (1990). Fronts, jet streams, and the tropopause: extratropical cyclones. *American Meteorological Society*, 167-191.

Sinclair, M. R. (1994). An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122(10), 2239-2256.

Sinclair, M. R. (1995). A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 123(6), 1601-1619.

Sondermann, M., Chou, S. C., Martins, R. G., Amaro, L. C., & Gomes, R. D. O. (2024). Explosive Cyclone Impact on the Power Distribution Grid in Rio Grande do Sul, Brazil. *Climate*, 12(3), 29.

Streten, N. A., & Troup, A. J. (1973). A synoptic climatology of satellite observed cloud vortices over the Southern Hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 99(419), 56-72.

Stull, R. B. (1988). Mean boundary layer characteristics. In *An introduction to boundary layer meteorology* (pp. 1-27). Dordrecht: Springer Netherlands.

Taljaard, J. J. (1967). Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6(6), 973-987.

Vera, C. S., Vigliarolo, P. K., & Berbery, E. H. (2002). Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130(3), 684-699.