



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO: CLIMATOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Marcos Vinícius de Jesus Pristo

Rio de Janeiro, RJ
Julho, 2019

CHUVAS INTENSAS NO MUNÍCIPIO DO RIO DE JANEIRO:
CLIMATOLOGIA E ESTUDO DE CASO

MARCOS VINÍCIUS DE JESUS PRISTO

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

Orientadores: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski e D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes

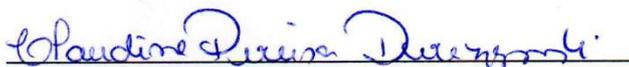
Rio de Janeiro

Julho de 2019

Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro: Climatologia e Estudo de Caso

MARCOS VINÍCIUS DE JESUS PRISTO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.



Profa. Dra. Claudine Pereira Dereczynski



Prof. Dr. Wallace Figueiredo Menezes



Profa. Dra. Chou Sin Chan



Profa. Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos



Dra. Flávia Rodrigues Pinheiro

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2019

PRISTO, MARCOS V. J.

**CHUVAS INTENSAS NO MUNÍCIPIO DO RIO DE JANEIRO:
CLIMATOLOGIA E ESTUDO DE CASO/ MARCOS
VINÍCIUS DE JESUS PRISTO**

Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2019, 126p.

Orientadora: D.Sc Claudine Pereira Dereczynski

Co-orientadora: D.Sc Wallace Figueiredo Menezes

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2019.

Referências Bibliográficas: pp. 104-112.

1. Chuvas Intensas
2. Modelo Eta
3. Índices de Instabilidade Atmosférica

“Feliz é aquele que não sabota o caminho alheio, que não deseja o que é do outro, que não tenta ser quem não é que não usufrui daquilo que é seu, que não prejudica ninguém só para se dar bem. Vive bem quem vive honestamente, e só cresce na vida, quem sabe dar valor ao que é, e ao que tem.”

Agradecimento

Agradeço,

A orientadora, Claudine por reacreditar na minha capacidade e por ter me guiado nesta volta a Universidade. Além de uma orientadora, demonstrou ser uma grande amiga, pela sua paciência ao me orientar, por se mostrar preocupada e pela sua atenção e vontade de ajudar sempre que precisei. Ao meu co-orientador Wallace Menezes, por estar presente sempre nas horas solicitadas e pelos conhecimentos passados ao longo deste estudo.

Aos meus Pais (Ângela e Lucio Pristo) que me ensinaram a nunca desistir de meus objetivos, sempre me incentivando com palavras e “cobranças” para não desistir de um sonho. Ao meu irmão (Eduardo), por sempre se preocupar e estar presente nas horas que preciso e por me ensinar a ultrapassar os obstáculos que aparecem no decorrer da vida. A minha avó (Ana Conceição) por minha criação e educação na minha infância. A minha noiva (Renata Sena) por entender que o meu nervosismo, sempre está presente. Quando eu “desacreditava” da minha capacidade, ela estava lá presente para dar esperança. Obrigado pela força que me passa e pelo carinho, por aguentar minha falta de humor e minhas decisões, mesmo sem motivos. E principalmente, por ter trazido ao mundo a melhor inspiração e força que uma pessoa pode conseguir, minha filha MARIA EDUARDA SENA PRISTO.

Aos amigos de longa data que acompanham minha caminhada e sabem dos desafios e dificuldades vencidas até o momento. Aos meus novos companheiros que o mestrado me trouxe ao longo desses dois anos e que estiveram me acompanhando nos estudos e “ideias” durante esta jornada.

Ao Laboratório de Prognósticos em Mesoescala (LPM) pelo suporte técnico e a UFRJ pela bolsa de mestrado e por financiar minhas viagens para congressos, e outros eventos. Aos professores e funcionários do Departamento de Meteorologia da UFRJ pela ajuda e ensinamento durante esta caminhada. A Doutora Chou Sin Chan e aos integrantes do PROJETA pela ajuda e auxílio na solução de problemas.

A Deus pela força, pela proteção, pela fé, pela coragem e por ter me iluminado nos momentos de confusão e indecisões, me guiando para o caminho da razão e da felicidade, me trazendo saúde e perseverança para alcançar meu destino. MUITO OBRIGADO a todos que estiveram presente e me ajudaram durante esta minha longa jornada.

RESUMO

CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO: CLIMATOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Marcos Vinícius de Jesus Pristo

Orientadores: Claudine Pereira Dereczynski e Wallace Menezes Figueiredo

Programa: Meteorologia

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

Neste trabalho elabora-se uma climatologia (1997-2016) de eventos de chuvas intensas (ECI) no Município do Rio de Janeiro (MRJ) e realiza-se um estudo de caso de ECI ocorrido em fevereiro de 2018 com registros de grandes transtornos no MRJ. Considera-se ECI todo evento no qual o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95, com ocorrência de pelo menos um registro de chuva em 15 minutos igual ou superior ao percentil 95 no mesmo dia. O objetivo deste trabalho é realizar uma climatologia de ECI no MRJ e identificar os principais mecanismos, em escala sinótica e em mesoescala, responsáveis pela ocorrência do ECI ocorrido em fevereiro de 2018. Totais pluviométricos coletados a cada 15 minutos em 33 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio são utilizados para elaboração da climatologia de ECIs para o período de 1997 a 2016. O estudo de caso é realizado a partir dos dados do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), imagens de satélite, cartas sinóticas do Serviço Meteorológico Marinho e dados de aeródromos da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. Para descrição do comportamento dos índices atmosféricos, são realizadas simulações utilizando o modelo regional Eta, com resolução horizontal de 1 km, sendo criados 4 membros a partir de combinações entre as parametrizações convectiva (Betts-Miller-Janjic – BMJ, Kain-Fritsch – KF e Kain-Fritsch com inclusão de Fluxo de Momentum – KFMX) e de microfísica (Ferrier – FER ou Zhao – ZHAO). Os resultados da climatologia indicam que os máximos valores de ECI são coincidentes com as regiões mais chuvosas da cidade, localizadas próximos aos maciços, com registros de 8,0 ECI por ano no Sumaré e no Mendanha. O mínimo de eventos é observado na Tijuca e Saúde (5,7 ECI/ano). A respeito da frequência de ocorrência de ECIs em toda a cidade, pode-se esperar um total de 30 dias de ECIs por

ano, com a maior parte deles (70%) ocorrendo no período chuvoso, entre dezembro e abril. Ademais, 33% do total pluviométrico anual médio no MRJ (1192 mm) ocorre durante 6,6 dias de ECIs. O estudo ECI do dia 15/02/2018 mostrou que após a passagem do Sistema Frontal (SF) sobre o MRJ, áreas de instabilidades continuaram atuando sobre a região de estudo, com formação de sistemas convectivos de mesoescala durante a noite do dia 14 e madrugada do dia 15/02. Um cavado estendendo-se por todos os níveis da troposfera ofereceu suporte ao SF. Em superfície verificou-se a presença de um centro de baixa pressão sobre o litoral do Estado do Rio de Janeiro (ERJ), promovendo a convergência de umidade na região. Do ponto de vista termodinâmico, a sondagem do Aeroporto do Galeão apresentou valores significativos de índices de instabilidade, com o índice K ultrapassando o valor de 41°C , o Índice Total Totals (TT) atingindo o valor de 48°C e a energia potencial convectiva disponível (CAPE) com valores superiores a 1000 J/Kg . As simulações do modelo Eta não representaram bem a intensidade da precipitação durante o ECI, porém, são simulados valores significativos de índices de instabilidade (CAPE, K, TT, TTK e índice de energia). A combinação desses índices simulados durante o caso estudado indica que a região de estudo apresentava alto potencial para ocorrência de sistemas convectivos, principalmente através da simulação do membro BMJ_ZHAO. Portanto, a utilização da modelagem regional por conjunto para previsão dos índices de instabilidade destaca-se como uma ferramenta muito útil para apoiar a previsão de tempestades convectivas intensas como ocorrida neste ECI.

ABSTRACT

HEAVY RAINFALL IN THE RIO DE JANEIRO CITY: CLIMATOLOGY AND A CASE STUDY

Marcos Vinícius de Jesus Pristo

Advisors: Claudine Pereira Dereczynski e Wallace Menezes Figueiredo

Departament: Meteorology

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

In this work, we provide a climatology (1997-2016) of heavy rain events (HRE) in the city of Rio de Janeiro (CRJ) and a case study of HRE occurred in February 2018 with records of major disturbances in CRJ. HRE is considered to be any event in which the total daily rainfall is equal to or greater than the 95th percentile, with at least one record of rainfall occurring in 15 minutes equal to or greater than the 95th percentile on the same day. This work aims to perform an HRE climatology in CRJ and identify the main mechanisms, in synoptic scale and mesoscale, responsible for the occurrence of the HRE that occurred in February 2018. Rainfall totals collected every 15 minutes in 33 Alert Rio System precipitation gauges are used for the development of the HREs climatology for the period 1997-2016. For the case study, we use the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) data, satellite images, synoptic charts from the Marine Meteorological Service and aerodrome data from the Air Force Command Meteorological Network. To verify the behavior of atmospheric indices, simulations are performed using the regional Eta model, with a horizontal resolution of 1 km, and we used 4 members from combinations of convective parameters (Betts-Miller-Janjic - BMJ, Kain-Fritsch - KF and Kain-Fritsch including Momentum Flux (KFMX) and Microphysics (Ferrier - FER or Zhao - ZHAO). The climatology results indicate that the maximum HRE values are coincident with the rainiest regions of the city, located near the massifs, with records of 8.0 HRE per year in Sumaré and Mendanha. We observe a minimum of events in Tijuca and Saúde (5.7 HRE / year). Regarding the frequency of HREs occurring throughout the city, a total of 30 days of HREs can be expected per year, with most of them (70%) occurring in the rainy season between December and April.

Besides, 33% of the total annual average rainfall in CRJ (1192 mm) occurs during 6.6 days of HREs. The HRE study of 15/02/2018 showed that after the Frontal System (FS) passage over CRJ, instability areas still acted on the study region, along with the formation of convective mesoscale systems during the night of the 14th and dawn on 2/15. A trough presence in all levels of the troposphere supported the FS. We verified the presence of a low pressure surface center on the State of Rio de Janeiro coast, supporting the convergence of humidity in the region. From the thermodynamic point of view, the Galeão Airport survey showed significant values of instability indices, with the K index exceeding 41°C , the Total Totals Index (TT) reaching 48°C and the convective available potential energy (CAPE) with values greater than 1000 J / kg . The Eta model simulations were not able to represent well enough the precipitation intensity during the HRE, however, they simulated significant values of instability indices (CAPE, K, TT, TTK, and energy index). The combination of these simulated indices during the case study indicates that the study region had a high potential for the occurrence of convective systems, mainly through the simulation of the BMJ_ZHAO member. Therefore, the use of regional ensemble modeling to predict instability indices stands out as a very useful tool to support the prediction of intense convective storms as occurred in this HRE.

Sumário

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figuras	xiv
Lista de Siglas e Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Características de Sistemas Frontais Associados a Eventos de Chuva Intensa	5
2.2 Estudos de Casos de Chuvas Intensas Associados a Sistemas de Mesoescala	11
3 Dados e Metodologia	16
3.1 Elaboração das climatologias da precipitação e de ECIs no MRJ	16
3.1.1 Critério de Identificação de ECI	19
3.2 Dados Observados e Metodologia para o Estudo de Caso	21
3.2.1 Reanálise CFSRv2	21
3.2.2 Precipitação	21
3.2.3 Imagens de Satélite	22
3.2.4 Imagens de Radar	22
3.2.5 Cartas Sinóticas	22
3.2.6 Dados de Aeródromos	22
3.3 Modelo Regional Eta	23
3.3.1 Simulações do ECI	24
3.4 Índices de Instabilidade Atmosférica	26
3.4.1 Índice K	26
3.4.2 Índice <i>Total Totals</i> – TT	27
3.4.3 Índice TTK	28
3.4.4 Energia Potencial Convectiva Disponível – CAPE	28
3.4.5 Energia Total e Índice de Energia	29
4 Climatologias da precipitação e de ECIs no MRJ	33
4.1 Climatologia da Precipitação no MRJ	33
4.2 Climatologia de ECIs no MRJ	49

4.2.1	Avaliação do Critério utilizado para Identificação de Eventos de Chuva Intensa	49
4.2.2	Climatologia de Eventos de Chuva Intensa (1997-2016)	52
4.3	Considerações sobre as Climatologias de Precipitação e ECI	63
5	Estudo do Evento de Chuva Intensa de 15 de fevereiro de 2018	65
5.1	Descrição do ECI a partir de Dados Observacionais	66
5.2	Análise Sinótica	74
5.3	Simulação do Modelo Eta	86
5.3.1	Precipitação	86
5.3.2	Índices de Instabilidade	89
5.4	Considerações sobre o ECI de 15 de fevereiro de 2018	103
6	Conclusões	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	Apêndice I – Totais Pluviométricos Médios Mensais/Anual	116
	Apêndice II – Média Mensal dos dias Úmidos (precipitação \geq 1mm/dia)	118
	Apêndice IV – Séries temporais por estação dos totais anuais de ECI	121
	Apêndice V – Campos Sinóticos entre 13 e 15 de fevereiro de 2018	125

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Informações sobre os postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho. Os postos estão divididos nos Grupo I (em negrito), II (sublinhados) e III (itálico).	18
Tabela 3.2 – Modelo de tabela de contingência para avaliação dos ECIs ocorridos no MRJ.	20
Tabela 3.3 – Parametrizações utilizadas nas simulações com modelo Eta-1km.	25
Tabela 4.1 – Valores dos limiares de precipitação fraca (inferior ao percentil 75), moderada (maior ou igual ao percentil 75 e inferior ao percentil 90), moderadamente intensa (maior ou igual ao percentil 90 e inferior ao percentil 95), intensa (maior ou igual ao percentil 95 e inferior ao percentil 99) e muito intensa (maior ou igual ao percentil 99), para os 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho. Os postos estão divididos nos Grupos I (em negrito), II (sublinhados) e III (em itálico) e, para cada um deles, apresentam-se na primeira (segunda) linha os limiares relativos a chv15min (chv24h). Os Percentis 95 de chv15min e chv24h estão em negrito.	45
Tabela 4.2 – Maiores totais pluviométricos (mm) acumulados em 15 minutos, 30 minutos, 1 hora e 24 horas registrados nos 32 postos pluviométricos entre 1997 e 2016.	47
Tabela 4.3 – Casos identificados como eventos de chuva intensa a partir do critério objetivo adotado.	50
Tabela 4.4 - Tabela de contingência para os dias de ocorrência de ECI em 2016 no MRJ.	51
Tabela 5.1 – Esquema de estratégia operacional aplicável à previsão de tempestades convectivas severas (baseada em Nascimento, 2005). Cada coluna representa um nível na escala temporal de previsão convectiva, sendo que a primeira linha contém o principal procedimento para identificação de situações favoráveis ao desenvolvimento de tempestades severas em cada nível, e a terceira linha apresenta as principais ferramentas a serem utilizadas.	65

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Topografia (m) do Município do Rio de Janeiro, com a localização dos Maciços da Tijuca, da Pedra Branca e do Gericinó. A localização dos 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho é representada por círculos coloridos, dependendo da região: Centro (roxo), Zona Norte (cinza), Zona Oeste (vermelho) e Zona Sul (azul). As estações atualmente desativadas são representadas por uma cruz preta. 1

Figura 1.2 - Fotos dos transtornos provocados pelo ECI de 15/02/2018 em: (a) Higienópolis, (b) Campo Grande, (c) Realengo, (d) São Conrado e (e) Maracanã. Fonte: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/temporal-no-rio-deixa-rastro-de-destruicao-veja-fotos.ghtml> 3

Figura 2.1 – Composto da anomalia da pressão ao nível médio do mar (hPa) de dois dias antes do evento (D-2 – primeira coluna) e no dia do evento (D0 – segunda coluna): negativo (linhas tracejadas) e positivo (linhas contínuas). O intervalo de contorno é de 0,5 hPa. Painéis (a, b) são para ECNs e (c, d) para ECIs. Áreas sombreadas são significativas no nível de 90%. Fonte: extraído de Lima et al. (2010). 7

Figura 2.2 – Composto da anomalia de altura geopotencial em 500 hPa (m_gp) de dois dias antes do evento (D-2 – primeira coluna) e no dia do evento (D0 – segunda coluna): negativo (linhas tracejadas) e positivo (linhas contínuas). O intervalo de contorno é de 5 m_gp. Painéis (a, b) são para ECN e (c, d) para ECIs. Áreas sombreadas são significativas no nível de 90%. Fonte: extraído de Lima et al. (2010). 8

Figura 2.3 – Diferença entre frentes frias que causam deslizamento e média climatológica entre 1995 e 2005 dos seguintes campos: a) Pressão Atmosférica ao Nível do Mar (hPa, sombreada) e espessura da camada de 500/1000hPa (m_gp, linha sólida) e b) umidade específica (g/kg, sombreada) em 850 hPa. Fonte: Seluchi et al. (2009). 9

Figura 2.4 – Campos meteorológicos para o dia 03/01/2000 – 0000 UTC: (a) Fluxo de umidade verticalmente integrado (sombreado, kg.m⁻¹.s⁻¹) entre 1000 e 300 hPa e pressão ao nível médio do mar (a cada 2 hPa) e (b) Altura geopotencial (sombreado, m_gp) e linha de corrente em 250 hPa. Fonte: Brasiliense et al. (2018). 10

Figura 3.1 – Topografia (metros) do domínio das simulações com resolução horizontal de (a) 1 km e (b) recorte no MRJ. 24

Figura 3.2 – Esquema do perfil atmosférico de ET em uma tarde antecedente ao disparo de tempestades convectivas severas. As flechas verticais indicam as trajetórias de parcelas

em ascensão e/ou em subsidência, considerando a não ocorrência de entranhamento durante o processo. Fonte: Traduzido de Darkow (1968). 31

Figura 4.1 – Climatologia do total pluviométrico anual (mm/ano) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio. 34

Figura 4.2 – Climatologia da precipitação média mensal (mm/mês) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno e (d) Primavera. 37

Figura 4.3 – Média anual de dias úmidos para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio (barra). A Linha tracejada representa a média no MRJ. . 41

Figura 4.4 – Distribuição sazonal dos dias úmidos (acumulado diário acima de 1 mm/dia) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio: Verão (vermelho); Outono (amarelo); Inverno (azul) e Primavera (verde). 42

Figura 4.5 – Ciclos anuais da precipitação (escala da esquerda em mm/mês – linha cheia) e dos dias úmidos (escala da direita dias/mês – linha tracejada) para cinco postos pluviométricos selecionados no MRJ. Climatologia do período (1997-2016). 43

Figura 4.6 – Número médio de dias no ano (linha) e o percentual médio da precipitação anual (barra) quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95. . 44

Figura 4.7 – Percentis 95 para precipitação acumulada em 24 horas (chv24min – mm/dia em barra) e percentil 95 de precipitação acumulada em 15 minutos (chv15min – mm/15min em linha). 49

Figura 4.8 – Número médio anual de dias de ECIs identificados para cada posto pluviométrico. 53

Figura 4.9 – Número médio sazonal de ECIs identificados para cada posto pluviométrico: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno e (d) Primavera 55

Figura 4.10 – Total anual de dias de ECIs identificados. O ano de 2001 foi excluído devido a apresentar mais de 20% de dados faltantes. Ocorrência média de ECI (linha tracejada). 59

Figura 4.11 – Ciclo anual do número médio de dias de ECI na Ilha do Governador (azul), em Piedade (vermelho) e para a média dos 26 postos pluviométricos utilizados (verde) com valores destacados.	61
Figura 4.12 – Dias de ECIs por ano (barra) e linha de tendência: (a) Piedade e (b) Sepetiba.	62
Figura 5.1 – Meteogramas dos aeródromos de (a) Galeão e (b) Santa Cruz. Fonte: http://weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/samerica.shtml	67
Figura 5.2 – Série temporal da precipitação (mm/15 min) entre 14/02/18 - 17 UTC e 15/02/18 – 05 UTC em todos os postos pluviométricos do Alerta Rio. O período de ocorrência do ECI encontra-se destacado no quadrado vermelho.....	69
Figura 5.3 – Distribuição temporal da precipitação (mm/15 min) no período mais chuvoso do ECI, nas 4 localidades mais afetadas pelo evento: (a) Rio Centro, (b) Cidade de Deus, (c) Piedade e (d) Estrada Grajau-Jacarepaguá.....	70
Figura 5.4 – Distribuição espacial da precipitação (mm) acumulada no dia 15/02/18 entre: (a) 01 e 03 UTC; (b) 01 e 02 UTC e (c) 02 e 03 UTC.	71
Figura 5.5 – Maiores acumulados de precipitação em 1 hora durante o ECI (vermelho) e climatologia da precipitação do mês de fevereiro (1997-2016) para os 33 postos pluviométricos do sistema Alerta Rio.	72
Figura 5.6 – Sondagens da estação automática de altitude do Aeroporto do Galeão em (a) 14 de fevereiro as 12 UTC e (b) 15 de fevereiro as 00 UTC.....	73
Figura 5.7 – Cartas de pressão ao nível médio do mar (a cada 4 hPa): (a) 13/02/18 – 00 UTC, (b) 13/02/18 – 12 UTC, (c) 14/02/18 – 00 UTC, (d) 14/02/18 – 12 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 12 UTC. Fonte: Serviço Meteorológico Marinho da Marinha do Brasil	76
Figura 5.8 – Imagens de satélite do canal 14 (11.2 μ) do GOES-16: (a) 13/02/18 – 00 UTC, (b) 13/02/18 – 12 UTC, (c) 14/02/18 – 00 UTC, (d) 14/02/18 – 12 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 12 UTC. Fonte: DSA/CPTEC/INPE.	78

Figura 5.9 – Campos de pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 2 hPa), vento em 1000 hPa e espessura 500-1000 hPa (sombreado a cada 40 mgp): (a) 14/02/18 – 00 UTC, (b) 14/02/18 – 06 UTC, (c) 14/02/18 – 12 UTC, (d) 14/02/18 – 18 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 06 UTC.	81
Figura 5.10 – Linhas de corrente e altura geopotencial (sombreado a cada 100 mgp) em 300 hPa: (a) 14/02/18 – 00 UTC, (b) 14/02/18 – 06 UTC, (c) 14/02/18 – 12 UTC, (d) 14/02/18 – 18 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 06 UTC..	83
Figura 5.11 – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado entre 300 e 1000 hPa (sombreado a cada 100 Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹) e pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 2 hPa) em: (a) 14/02/18 – 00 UTC, (b) 14/02/18 – 06 UTC, (c) 14/02/18 – 12 UTC, (d) 14/02/18 – 18 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 06 UTC.	85
Figura 5.12 – Precipitação acumulada (mm/6h) entre 23 UTC do dia 14/02/2018 e 04 UTC do dia 15/02/2018: Sistema AlertaRio.	86
Figura 5.13 - Precipitação Total acumulada (mm/6h) entre 23 UTC do dia 14/02/2018 e 04 UTC do dia 15/02/2018: (a) BMJ_FER, (b) BMJ_ZHAO, (c) KF_FER e (d) KFMX_FER.	87
Figura 5.14 – (a) Precipitação de Grande Escala e (b) Precipitação Convectiva acumulada (mm/6h) entre 23 UTC do dia 14/02/2018 e 04 UTC do dia 15/02/2018....	88
Figura 5.15 – Índice K (°C): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC,(c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC.....	90
Figura 5.16 – Índice TT (°C): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC,(c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC.....	92
Figura 5.17 – Índice TTK (°C): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC,(c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC.	94

Figura 5.18 – Série temporal da intensidade do vento e rajadas (nós), Índice K (°C), Índice TT (°C), e Índice TTK (°C) nos aeródromos do MRJ: (a) SBSC, (b) SBRJ e (c) SBGL. O retângulo vermelho destaca o horário da ocorrência do ECI..... 96

Figura 5.19 – Energia Potencial Convectiva Disponível – CAPE (J/Kg): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC, (c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC. 100

Figura 5.20 - Índice de Energia – IE (10^{-3} J/kg): (a) do dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) do dia 14/02/2018 às 18 UTC e (c) do dia 15/02/2018 às 00 UTC. 102

Lista de Siglas e Abreviaturas

AC	Acerto
AF	Alarme Falso
BMJ	Betts-Miller-Janjic
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System
CAPE	Energia Potencial Convectiva Disponível
Cb	Cumulonimbus
CFSRv2	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i> , na Versão 2
chv15min	Totais Pluviométricos 15 Minutos
chv24h	Totais Pluviométricos Diários
CLA	Camada Limite Atmosférica
CMORPH	<i>Climate Prediction Center Morphing Method</i>
COR	Centro de Operações Rio
Cp	Calor Específico do Ar A Pressão Constante
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo E Estudos Climáticas
D0	Dia do Evento
D-2	Dois dias Antes ao Evento
DJF	Dezembro-Janeiro-Fevereiro
DOM09	Dereczynski <i>et al.</i> (2009)
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DWSR	<i>Doppler Weather Surveillance Radar</i>
ECI	Evento de Chuva Intensa
ECNs	Evento de Chuva Normal
ERJ	Estado do Rio De Janeiro
ET	Energia Total
g	Aceleração da Gravidade
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite Program</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
gZ	Geopotencial
HBV	Horário Brasileiro de Verão
HN	Hemisfério Norte
hPa	Hectopascal

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
IPP	Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos
JJA	Junho-Julho-Agosto
KF	Kain-Fritsch
KFMX	Kain-Fritsch Com Inclusão de Fluxo de Momentum
MAM	Março-Abril-Maio
MeDPAt-EEC	Método de Detecção de Padrões Atmosféricos de Eventos Extremos de Chuva
mgp	Metro Geopotencial
mm/dia	Milímetros por Dia
MRJ	Município do Rio de Janeiro
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCE	Nível de Convecção Espontânea
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NEL	Nível de Equilíbrio ou Nível de Perda de Empuxo Da Parcela
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
POD	Probabilidade de Detecção
q	Umidade Específica
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
RSRJ	Região Serrana do Rio De Janeiro
S	Sul
SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SF	Sistema Frontal
SMM - MB	Serviço Meteorológico Marinho da Marinha do Brasil
SON	Setembro-Outubro-Novembro
T	Temperatura
TMC	Transporte de Momentum Convectivo
TS	Índice Crítico de Sucesso
TT	Total Totals
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
V	Velocidade Escalar
VCEZ	Vórtice Ciclônico Embebido na Zona de Convergência do Atlântico Sul

W	Oeste
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZN	Zona Norte
ZO	Zona Oeste
ZS	Zona Sul

1 Introdução

O município do Rio de Janeiro (MRJ), capital do Estado de mesmo nome, localizado na Região Sudeste do Brasil, é uma importante metrópole brasileira. A região apresenta grande densidade populacional, com 6.520.266 habitantes (população estimada para 2017 – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2018) residindo numa área urbanizada de 595 km², sendo a área territorial total da cidade de 1.204 km² (Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos – IPP, 2018). A complexidade da orografia da cidade (Figura 1.1), com o Maciço da Tijuca dividindo-a nas Zonas Sul e Norte, os maciços do Gericinó ao norte e o da Pedra Branca a oeste, contribuem para a grande variabilidade espacial da precipitação. Além disso, a cidade sofre influência do oceano Atlântico, ao sul, das baías de Sepetiba a oeste e da Guanabara a leste.

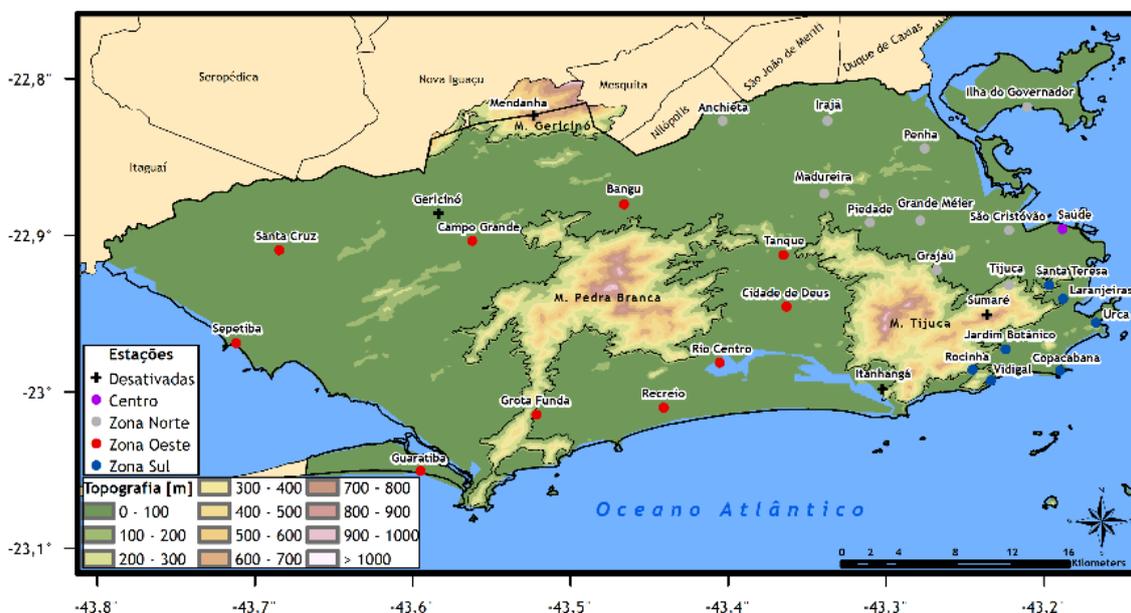


Figura 1.1 - Topografia (m) do Município do Rio de Janeiro, com a localização dos Maciços da Tijuca, da Pedra Branca e do Gericinó. A localização dos 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho é representada por círculos coloridos, dependendo da região: Centro (roxo), Zona Norte (cinza), Zona Oeste (vermelho) e Zona Sul (azul). As estações atualmente desativadas são representadas por uma cruz preta.

No MRJ é comum a ocorrência de eventos de chuva intensa (ECI) concentrada em curto período de tempo, principalmente durante o verão e outono, deflagrando uma série de transtornos à população, que já convive com esse problema desde a fundação da cidade (Dereczynski *et al.*, 2017). Dessa forma, devido ao impacto socioeconômico dos ECIs é importante entender os mecanismos que geram tais eventos, assim como sua frequência, intensidade, localização e padrões desses eventos intensos na cidade.

Ademais, o processo de previsão de ECIs poderia ser fortemente apoiado por uma maior compreensão da climatologia de tais eventos.

Os sistemas meteorológicos candidatos a provocar ECIs, são sistemas formados por cumulonimbus (Cb), nuvens de grande desenvolvimento vertical, associadas a chuvas de grande intensidade (altas taxas de precipitação) em curto período de tempo. A maioria dessas tempestades, denominadas como sistemas convectivos, apresentam curta duração e não contém condições de tempo severo. No entanto, uma parte delas poderá ocasionalmente, se desenvolver e se intensificar significativamente em um ambiente com estrutura termodinâmica favorável, contribuindo para o crescimento e sustentação de tempestades mais intensas. Essas tempestades, de caráter mais organizado, são conhecidas como Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) que podem desenvolver-se na atmosfera e estão usualmente associados com chuvas fortes, descargas atmosféricas, ventos locais intensos, podendo deflagrar uma série de destruições, ocorrência de granizo e até de tornados.

Dessa forma, fica evidente que um tipo de sistema de tempo potencialmente propenso a produzir ECIs são os SCMs. De forma mais específica, nos SCMs, um fator a ser destacado é o curto tempo de formação e desenvolvimento de uma tempestade convectiva, que pode ser de poucas horas ou até mesmo menos de uma hora, o que torna a sua previsão bastante difícil para o setor operacional (Weisman e Klemp, 1986). Assim, é muito importante o esforço no sentido de se conseguir uma quantidade maior de informações sobre a situação ambiental favorável à formação e ao desenvolvimento desses fenômenos.

Com o objetivo de ajudar no prognóstico de ocorrências futuras de ECIs, através do maior conhecimento dos processos físicos que levaram à ocorrência de um determinado fenômeno meteorológico, é comum o uso de uma técnica conhecida como “hindcast”, que consiste no estudo de casos passados. Menezes (1998), Menezes e Silva Dias (1996, 1998, 2004), Mourão (2007), Pereira (2015) entre outros, utilizaram esse tipo de procedimento para casos de tempestades ocorridas em diferentes partes do Brasil. A primeira etapa desse tipo de estudo consiste na descrição observacional, com o objetivo de coletar o máximo de informações, a fim de se fazer a melhor caracterização possível do evento estudado. Elabora-se, inicialmente, uma descrição geral do evento. Depois, conduz-se uma análise das condições sinóticas e em mesoescala, precedentes e durante a ocorrência do fenômeno. Um melhor conhecimento dessas condições físicas da

atmosfera, principalmente do ponto de vista termodinâmico e dinâmico, gera subsídios para aprimorar um modelo conceitual para formação e evolução de tempestades (que podem produzir ECIs), e futuramente servir como ferramenta de auxílio à previsão desse tipo de fenômeno.

No final do dia 14/02/2018 e nas primeiras horas do dia 15/02/2018 ocorreu um ECI no MRJ, ocasionando diversos transtornos na cidade (Figura 1.2), incluindo a morte de 6 pessoas, alagamentos, bolsões d'água, quedas de árvores, destruição de ciclovia entre outros transtornos. O evento ocorreu após a passagem de um sistema frontal (SF) no estado do Rio de Janeiro (ERJ) no dia 14/02/2018. Na estação Sepetiba do Sistema Alerta Rio, a precipitação atingiu 131 mm/dia e dessa forma, a partir da tarde desse dia a Prefeitura do Rio de Janeiro decretou “Estágio de Atenção” em toda a cidade. Na noite do dia 14/02/2018 e madrugada do dia 15 de fevereiro, com o deslocamento da frente fria para o oceano, foi observada a formação de SCMs no MRJ, que produziram chuva muito intensa, de curta duração, acompanhada por vários relâmpagos e fortes trovoadas. Dessa forma, a cidade entrou em “Estágio de Crise” durante todo o dia 15/02/2018, com acionamento de diversas sirenes em várias comunidades.



Figura 1.2 - Fotos dos transtornos provocados pelo ECI de 15/02/2018 em: (a) Higienópolis, (b) Campo Grande, (c) Realengo, (d) São Conrado e (e) Maracanã. Fonte: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/temporal-no-rio-deixa-rastro-de-destruicao-veja-fotos.ghtml>

1.1 Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho são a elaboração de uma climatologia de ECI entre o período de 1997 e 2016 no MRJ e identificar os possíveis mecanismos, em escala sinótica e na mesoescala, responsáveis pela formação do ECI que ocorreu em 15 de fevereiro de 2018 no MRJ. A expectativa é de que o melhor entendimento sobre o comportamento e desenvolvimento dos ECIs possa auxiliar na sua previsão. Como objetivos específicos destacam-se:

- i) Atualização da climatologia da precipitação sobre o MRJ, de Dereczynski *et al.* (2009), doravante DOM09, para o período de 20 anos (1997-2016) no MRJ;
- ii) Estudo do sistema meteorológico atuante durante o ECI de 15/02/2018; e
- iii) Simulações do ECI com o auxílio do modelo Eta (Mesinger *et al.*, 2012) no intuito de determinar de forma mais apurada os aspectos de mesoescala envolvidos na evolução do evento.

No próximo Capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre características de SFs associados a ECIs e de estudos de casos de chuvas intensas associados a sistemas de mesoescala. Os dados e a metodologia utilizados no trabalho são descritos no Capítulo 3. No Capítulo 4, desenvolve-se uma climatologia de ECI no MRJ e além disso, a climatologia de 10 anos de precipitação estabelecida por DOM09 é revisitada. No Capítulo 5, estão as análises (sinótica e de mesoescala) do estudo de caso de chuva intensa ocorrido no MRJ e as simulações do modelo Eta para o evento do dia 15/02/2018. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

Os sistemas meteorológicos que provocam ECIs são frequentemente associados com células de tempestades embebidas em sistemas de escala sinótica (McGinley, 1986). Chappell (1986) ressalta que as células convectivas se desenvolvem e interagem entre si na mesoescala (10-100 km), podendo ocasionar ECIs. Tais células convectivas tipicamente ocorrem dentro de um ambiente de escala sinótica (ou subsinótica), aproximadamente 100-1000 km, no qual vários parâmetros termodinâmicos (por exemplo, temperatura e umidade) exibem elevados valores (Konrad, 1997).

Elabora-se neste capítulo, uma revisão da literatura dividida nas seguintes Seções: i) Características de SFs associados a eventos de chuva intensa e ii) Estudos de casos de chuvas intensas associados a sistemas de mesoescala.

2.1 Características de Sistemas Frontais Associados a Eventos de Chuva Intensa

Diversos autores demonstram que os ECIs na Região Sudeste do Brasil estão associados principalmente a dois sistemas meteorológicos de escala sinótica: SFs e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

DOM09 classificam ECIs no MRJ quando ocorre precipitação acima de 30 mm/dia em no mínimo 5 estações concomitantemente. Foram identificados 160 ECIs no MRJ no período de 1997 a 2006, sendo a maior parte dos eventos (77%) provocados por atuação de SFs. Em seus resultados, os autores identificam que dos 15 ECIs mais intensos ocorridos durante o período estudado, cerca de 8 (53%) apresentam SCMs embebidos dentro de sistemas sinóticos.

Dolif e Nobre (2012), classificam ECIs quando a precipitação é superior a 50 mm/dia. Foram identificados 32 eventos atuando sobre o MRJ no período de 2000 a 2010, sendo 15 associados à passagem de SFs e 12 associados a ZCAS. Dolif (2012) aplica o Método de Detecção de Padrões Atmosféricos de Eventos Extremos de Chuva (MeDPAt-EEC) nas previsões do modelo Eta-40km, a fim de identificar padrões atmosféricos associados com ECIs. Dentre as combinações de variáveis testadas no trabalho, o composto entre as variáveis de umidade relativa em 900 hPa e vento meridional a 10 metros de altura apresentou o maior índice de detecção de ECIs. Outras combinações, por exemplo pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM) e altura geopotencial em 500 hPa, mostraram-se ineficientes para identificação desses eventos.

Andrade *et al.* (2015) realizaram estudos sobre as condições sinóticas associadas a um ECI (acumulados diários acima de 40 milímetros) ocorrido em março de 2013 no Rio de Janeiro. Para esse estudo, utilizando o MeDPAt-ECC de Dolif e Nobre (2012), os autores verificam que umidade relativa em 900 hPa e o vento em 10 metros como as principais variáveis para detectar o ECI.

Moura *et al.* (2013) utilizam campos de PNMM e de altura geopotencial em 500 hPa para obter padrões sinóticos relacionados a ECIs na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Os autores utilizam 9 estações meteorológicas do Sistema Alerta Rio entre o período de 1997 a 2010 para verificar padrões sinóticos de ECIs (definido quando a precipitação diária é superior ao percentil 95 (limiares entre 42 e 65 mm/dia) em pelo menos uma estação). Foi observado um total de 145 ECIs e três padrões sinóticos nesse estudo. No primeiro padrão sinótico encontrado verifica-se a presença de uma clássica frente fria de verão, com fraca componente de deslocamento meridional. O segundo padrão sinótico está relacionado a entrada de uma frente fria com intensa advecção de ar frio e o terceiro padrão está relacionado ao lento deslocamento de um anticiclone ao longo de 35°S, geralmente associado a um bloqueio atmosférico. Foi verificado nesse estudo, através da análise dos campos de umidade específica e direção e intensidade dos ventos, que houve um aumento do conteúdo de umidade específica sobre o MRJ no dia do ECI. Em 500 hPa, o primeiro padrão está relacionado a um pronunciado cavado baroclínico com deslocamento meridional, típico de inverno. No segundo padrão é observado um centro de alta pressão com lento deslocamento geralmente associado a um bloqueio atmosférico. O terceiro padrão apresenta um cavado com pouca amplitude que se desloca de maneira quase zonal.

Lima *et al.* (2010) classificam ECIs quando a precipitação diária é igual ou superior ao percentil 99, simultaneamente em 10 estações, dentre as 602 estações utilizadas nesse estudo, sobre a Região Sudeste do Brasil. Durante o período chuvoso (classificado neste estudo entre os meses de novembro e março), entre os anos de 1960 e 2005, foram identificados um total de 157 ECIs, dos quais 83 casos (53%) associados a SFs e 74 casos (47%) associados a ZCAS. Os compostos para os casos de SFs associados à eventos de chuva normal (ECN - entre os percentis 45 e 55) e para ECIs, são apresentados nas Figura 2.1 e Figura 2.2, respectivamente para a PNMM e para a altura geopotencial em 500 hPa. Nota-se na Figura 2.1, anomalias negativas no campo de PNMM sobre o sudeste da América do Sul, sendo mais intensas (valores mais baixos)

nos ECIs do que nos ECNs. Nos ECIs, as anomalias de PNMM passam de -1 hPa dois dias antes do evento (D-2), para -2 hPa no dia do evento (D0). Ademais, nota-se intensificação de anomalias positivas de PNMM ao sul do Sudeste do Brasil, indicando fortalecimento de uma massa de ar frio sobre a Argentina. No campo de altura geopotencial em 500 hPa (Figura 2.2), é verificado durante ECIs um trem de ondas, com orientação noroeste-sudeste, bem definido no Oceano Pacífico Sul e sobre a América do Sul, com uma forte crista sobre a Argentina e um forte cavado sobre o Sudeste do Brasil. De acordo com os pesquisadores, as anomalias de altura geopotencial em 500 hPa são mais fortes nos casos de SFs do que nos casos de ZCAS (figuras não apresentadas). De modo geral, os autores demonstram que as anomalias associadas com ECIs são significativamente mais intensas do que nos ECN em todos os campos atmosféricos fundamentais, tais como radiação de onda longa emergente, PNMM, altura geopotencial em 500 hPa e ventos nos baixos e altos níveis da troposfera.

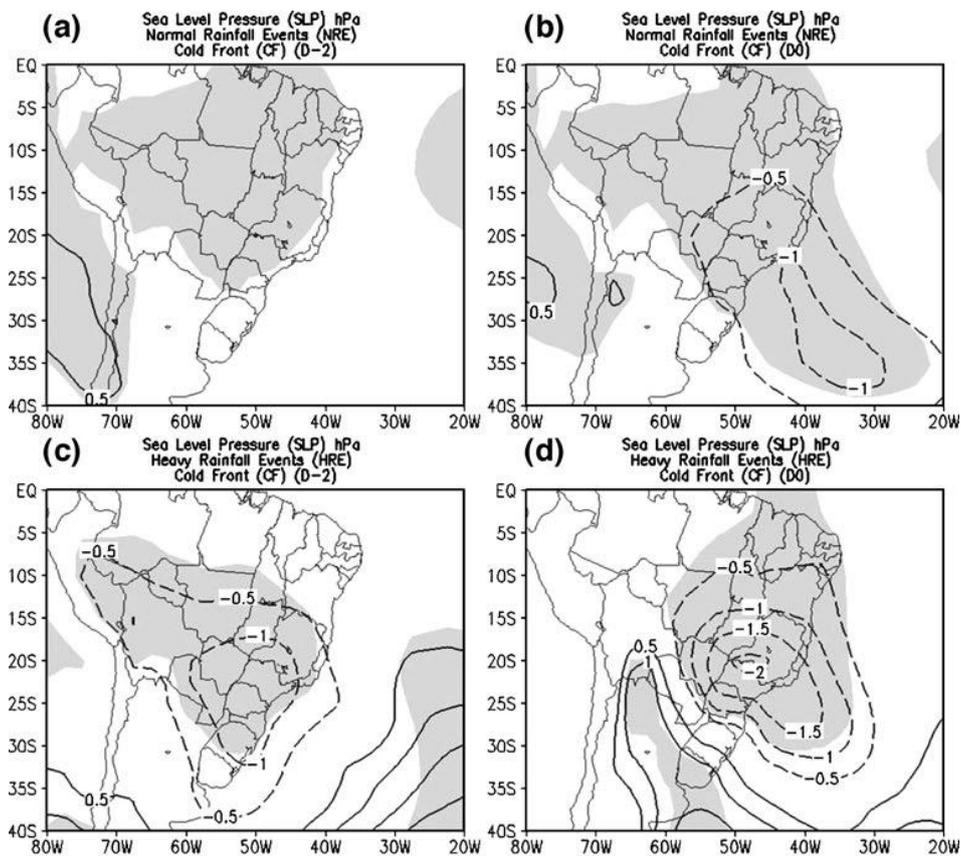


Figura 2.1 – Composto da anomalia da pressão ao nível médio do mar (hPa) de dois dias antes do evento (D-2 – primeira coluna) e no dia do evento (D0 – segunda coluna): negativo (linhas tracejadas) e positivo (linhas contínuas). O intervalo de contorno é de 0,5 hPa. Painéis (a, b) são para ECNs e (c, d) para ECIs. Áreas sombreadas são significativas no nível de 90%. Fonte: extraído de Lima et al. (2010).

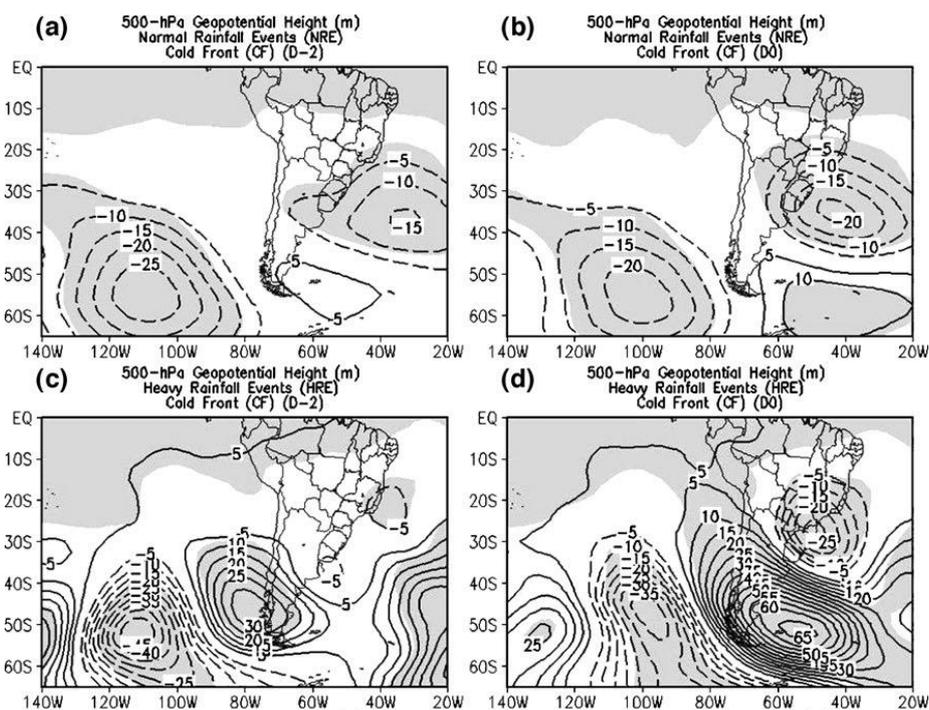


Figura 2.2 – Composto da anomalia de altura geopotencial em 500 hPa (m) de dois dias antes do evento (D-2 – primeira coluna) e no dia do evento (D0 – segunda coluna): negativo (linhas tracejadas) e positivo (linhas contínuas). O intervalo de contorno é de 5 m. Painéis (a, b) são para ECN e (c, d) para ECIs. Áreas sombreadas são significativas no nível de 90%. Fonte: extraído de Lima et al. (2010).

Em Seluchi *et al.* (2009), são utilizados dados da reanálise do *National Centers For Environmental Prediction/National Center For Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) durante o período de novembro a dezembro entre os anos de 1995 e 2005 para produzir uma climatologia sinótica de episódios que provocam eventos de chuvas intensas. Verifica-se que mais de 80% dos eventos de deslizamentos e desastres na região da Serra do Mar estão relacionados à ocorrência de ECIs durante a atuação de SFs e ZCAS. Nota-se no campo de anomalias da PNMM e espessura da camada entre 500/1000 hPa uma onda baroclínica se propagando em direção à região de estudo. No nível de 250 hPa verifica-se a existência de um cavado com amplificação máxima próximo à costa do litoral paulista, 24 horas antes da ocorrência dos desastres. Os autores apresentam campos de diferença entre as frentes frias que causam deslizamento e a climatologia de frentes frias do período estudado (Figura 2.3). De maneira geral, os autores observam que, do ponto de vista dinâmico e termodinâmico, as frentes frias que causam desastres foram mais intensas comparadas à climatologia do período 1995-2005, verificando-se: i) PNMM mais baixa e anticiclone migratório mais intenso; ii) circulação ciclônica mais intensa nos ventos em 850 hPa; iii) valores de umidade específica de 1 a 1,5 g/kg mais elevados do que a climatologia, com o máximo sobre a região de estudo.

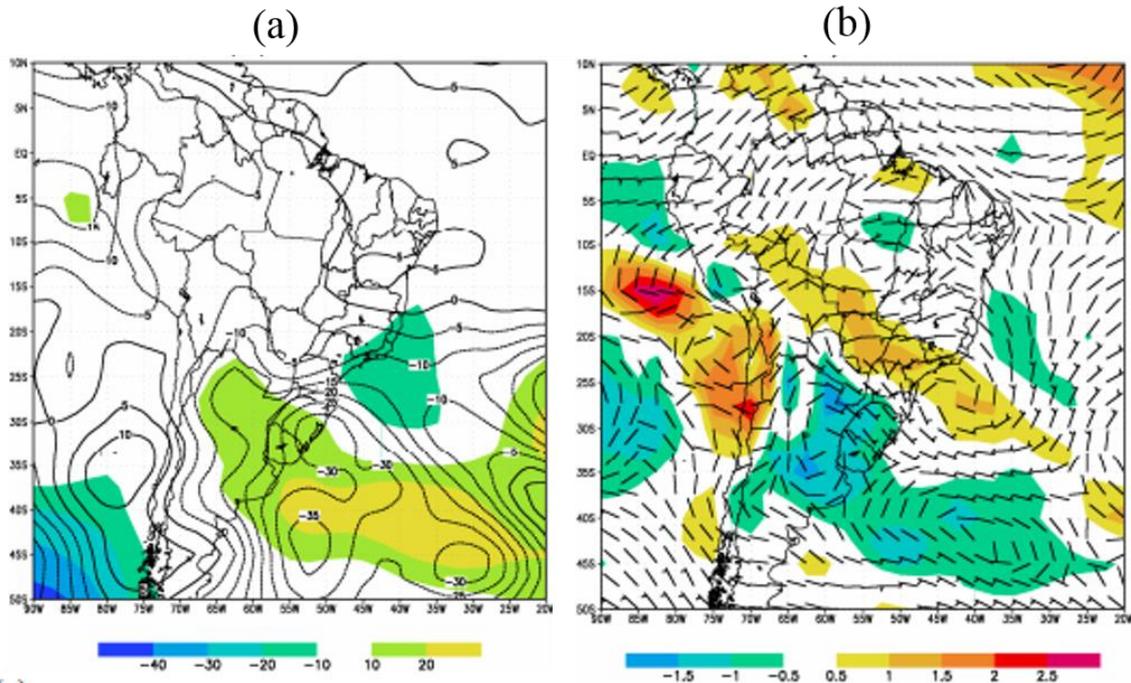


Figura 2.3 – Diferença entre frentes frias que causam deslizamento e média climatológica entre 1995 e 2005 dos seguintes campos: a) Pressão Atmosférica ao Nível do Mar (hPa, sombreada) e espessura da camada de 500/1000hPa (mgp, linha sólida) e b) umidade específica (g/kg, sombreada) em 850 hPa. Fonte: Seluchi et al. (2009).

Em Seluchi *et al.* (2016) é realizada uma análise das características meteorológicas de SFs que causam precipitações intensas (chuvosos) e não intensas (não chuvosos) na Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ). Os ECIs são classificados quando a precipitação diária é maior do que o percentil 99, sendo obtidos 43 casos. Os autores verificam que a distância entre o cavado frontal e a crista pós-frontal em níveis médios da atmosfera indica o predomínio de uma onda curta, favorecendo o incremento da advecção de vorticidade ciclônica e, portanto, dos movimentos verticais. Observa-se que as frentes frias que provocam volumes pluviométricos maiores, apresentam um contraste térmico mais acentuado, devido à existência de cavados e cristas mais intensos, em todos os níveis troposféricos. Em relação aos baixos níveis, a umidade específica é superior em mais de 1,5 g/kg nos casos chuvosos em relação aos casos não chuvosos, o que determina condições termodinâmicas mais propícias para a ocorrência de convecção, também favorecidas pela maior divergência de massa, presente nos altos níveis.

Teixeira *et al.* (2007) definem ECIs quando isoietas de 50 mm/dia abrangem uma área superior a 10000 km². Foram encontrados, na Região Sul do Brasil, 170 ECIs durante o período de 1991 a 2001. Os autores verificam, durante os ECIs, um maior aprofundamento no cavado em médios níveis movendo-se para região central da Argentina; a formação de um centro de baixa pressão mais intenso no norte da Argentina

e uma intensificação do jato de baixos níveis sobre o Paraguai comparado à eventos de chuva não intensas.

Polifke da Silva *et al.* (2015) discutem o papel do ambiente em escala sinótica para sistemas que produziram tempo severo no MRJ. Os autores encontraram que a divergência do vento em 300 hPa foi o indicador atmosférico que mostrou maior eficiência na detecção dos ECIs, seguido pela umidade específica em 850hPa, energia total de tempestades severas em 500 hPa e água precipitável.

Brasiliense *et al.* (2018) analisam características de um evento de chuva intensa (precipitação acima de 100 mm/dia) na Bacia do Rio Paraíba do Sul em janeiro 2000. Nesse trabalho os autores observam um SF se deslocando desde o sul do Brasil até o ERJ, permanecendo estacionário na região de estudo, configurando o primeiro evento de ZCAS do ano 2000, que durou 8 dias. Um vórtice ciclônico embebido na ZCAS (VCEZ), sobre o oceano, próximo à costa do Rio de Janeiro e São Paulo (Figura 2.4a), intensificou a precipitação na área de estudo. O VCEZ apresentou características de ciclone subtropical durante os primeiros dias e a seguir evoluiu para um ciclone extratropical. Nos altos níveis (Figura 2.4b), um padrão de bloqueio tipo dipolo sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai, formado por um ciclone relativamente frio e anticiclone relativamente quente, enfraqueceu o escoamento de oeste do Pacífico, promovendo o lento deslocamento da ZCAS.

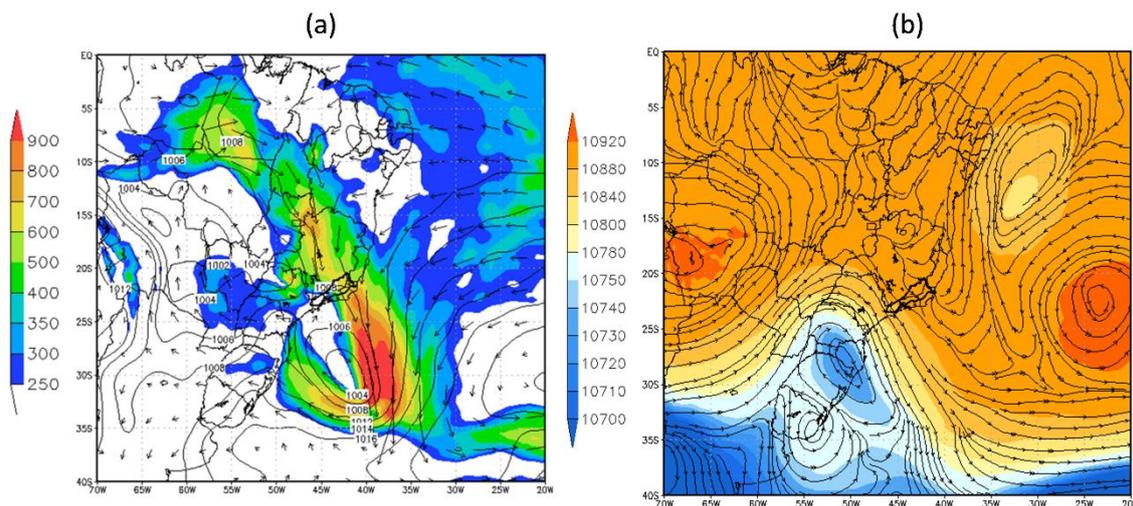


Figura 2.4 – Campos meteorológicos para o dia 03/01/2000 – 0000 UTC: (a) Fluxo de umidade verticalmente integrado (sombreado, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) entre 1000 e 300 hPa e pressão ao nível médio do mar (a cada 2 hPa) e (b) Altura geopotencial (sombreado, m) e linha de corrente em 250 hPa. Fonte: Brasiliense *et al.* (2018).

2.2 Estudos de Casos de Chuvas Intensas Associados a Sistemas de Mesoescala

Diversos estudos baseados em experimentos observacionais e em modelos teóricos indicam que o espectro de tipos de tempestades convectivas pode ser dependente de um número pequeno de parâmetros observacionais, que definem o ambiente no qual a tempestade crescerá.

Tempestades de caráter mais severo, que podem provocar chuvas intensas e ventanias, geralmente se formam em ambientes que possuem forte gradiente vertical de umidade, ou seja, ar bastante úmido em níveis baixos (que atua como “combustível” para formar a célula convectiva pela convergência de umidade) e uma camada de ar bastante seco (ou subsaturado) situada imediatamente acima do ar úmido de baixos níveis (Hane, 1986).

A grande maioria dos estudos sobre tempestades severas enfoca latitudes médias, onde o cisalhamento vertical do vento atinge valores que possibilitam a formação de vários tipos dessas tempestades. Uma grande quantidade de casos é descrita em Cotton e Anthes (1989). Entretanto, diversos estudos sobre tempestades severas em baixas latitudes também já foram realizados, visto que essas tempestades desempenham um papel muito importante no regime pluviométrico nas latitudes tropicais, particularmente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Vianello e Alves, 1991).

Abdoulæv e Lenskaia (1998) estudaram as classificações dos sistemas de convecção severa para o Rio Grande do Sul através dos valores de refletividade e deslocamento observados nas imagens do *Doppler Weather Surveillance Radar* (DWSR-88S) da Universidade Federal de Pelotas, mostrando que os radares fornecem muitas informações a respeito desses sistemas de precipitação intensa. Nesse trabalho, os autores conseguem observar a influência do vento na troposfera média no deslocamento e no tipo de nebulosidade formada das linhas de convecção severa.

Menezes (1998) utilizou o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) para simular um caso de linha de instabilidade que se deslocou sobre a cidade de Itu, no Estado de São Paulo, e alcançou um SF que já havia passado sobre a região. Aparentemente a “colisão” gerou uma repentina intensificação da convecção sobre o local, provocando a ocorrência de fortes tempestades. Ainda em Menezes (1998) foi simulado o caso de uma supercélula que atingiu a cidade de Ribeirão Preto, em São Paulo. A situação sinótica na data do evento, em termos termodinâmicos e dinâmicos, favorecia

a amplificação da convecção no local. Os prejuízos materiais foram calculados em torno de 11 milhões de dólares, 130 pessoas ficaram feridas e houve três mortes.

Sales e Pereira Filho (2000) estudaram uma linha de instabilidade que adentrou a Grande São Paulo em 1º de outubro de 1997, provocando fortes rajadas de vento e intensa precipitação. Foram investigadas, através das análises do NCEP, as condições sinóticas associadas à formação e ao desenvolvimento dessa linha de instabilidade, a fim de caracterizar o ambiente no qual este SCM ocorreu.

Lima *et al.* (1998) revisaram os processos da frontogênese e da instabilidade de mesoescala e aplicaram a um caso de frente fria que ocorreu no dia 2 de setembro de 1996 na região Sul do Brasil, cuja evolução foi descrita pelo modelo regional Eta. Para tal, avaliaram a variação temporal do gradiente de temperatura.

Silva Paiva e Menezes (2000) estudaram a formação de linhas de estabilidade no ERJ e ressaltaram que a convergência de massa e de umidade em baixos níveis e a topografia foram os principais fatores que ajudaram na formação das tempestades em multicélulas (linhas de instabilidade) estudadas.

Xavier (2002) estudou um caso de tempestade multicelular que atingiu cidade do Rio de Janeiro no dia 15 de novembro de 2001, utilizando imagens de radar e modelagem regional. A característica principal encontrada foi a presença de um “bolsão” de temperaturas máximas na região do sistema convectivo, indicando que a flutuabilidade, devido ao gradiente de temperatura intenso, pode ter funcionado como um gatilho importante para o disparo da tempestade.

Barcelos (2009) propõe uma metodologia de alerta de chuvas intensas para a cidade do Rio de Janeiro através da identificação de variáveis meteorológicas que indicam a formação de tempestades, sendo essas: a pressão ao nível médio do mar, a convergência do vento em 1000 hPa, a divergência do vento em 250 hPa, ômega em 500 hPa, a convergência de umidade em 1000 hPa, a instabilidade convectiva, o índice K e o índice CK. Foram identificados 169 ECIs ocorridos entre 1998 e 2005. Analisando os resultados, o autor identifica que as variáveis mais eficazes em escala sinótica (em mesoescala) para indicar a formação de tempestade são a convergência de umidade em 1000 hPa, o índice CK e a instabilidade convectiva (índice K, o índice CK e a instabilidade convectiva).

Franco (2017) realizou um estudo de caso de um provável *downburst* ocorrido na cidade do Rio de Janeiro em fevereiro de 2016. Nesse estudo foram analisados dados de

estações meteorológicas de superfície, cartas sinóticas, imagens de satélite e radar e reanálises do CFSR para análise sinótica e de mesoescala envolvendo os dois dias que antecederam o evento e o próprio dia do evento. Ainda com o uso das reanálises, os índices atmosféricos TTK (diferença algébrica entre os índices TT e K), DCAPE (*Downdraft Convective Available Potential Energy* - Energia Potencial Convectiva Descendente) e WMSI (*Wet Microburst Severity Index* - Índice de Severidade de Microexplosões Úmidas) foram aplicados para o dia do evento, numa tentativa de verificar qual índice se mostra mais eficaz na previsão de fortes correntes descendentes. Foram observados valores bem altos, tanto para K como para TT, o que produziu um baixo TTK, indicando uma atmosfera úmida de 850 hPa até médios níveis sem a presença de uma camada subsaturada em 700 hPa (K alto) e uma intensa *lapse rate* (TT alto). Esse resultado mostra que o índice TTK não pode ser usado isoladamente para previsão de *downbursts*, porque muitas vezes a camada seca encontra-se acima de 700 hPa. Nota-se também que altos valores do índice K podem estar sim vinculados a tempestades severas com ventanias e fortes correntes descendentes.

Polifke da Silva (2014) estabeleceu em seu estudo limiares para indicadores atmosféricos nos dias de ocorrência de chuvas severas para a cidade do Rio de Janeiro. Nesse trabalho foram considerados como indicadores de tempo severo: o índice K, o índice TT, o índice KO, o conteúdo de água precipitável, a taxa de variação vertical de temperatura entre 500 e 700 hPa, a divergência em 300hPa, o movimento vertical em 500 hPa, a energia total de tempestades severas em 500 hPa, a CAPE, o fluxo de energia estática úmida em 850 hPa, o fluxo de energia estática saturada em 850 hPa, a pressão ao nível médio do mar e umidade específica em 850hPa. Foram selecionados 15 eventos de chuva severa entre 1997-2008. O autor observou algumas características similares entre os campos médios espaciais e temporais obtidos. A primeira característica que chamou à atenção foi o pico máximo dos índices K, TT e umidade específica em 850hPa, e queda significativa da PNMM antes que ocorresse a precipitação. Este comportamento médio caracteriza que, nos casos estudados, essas variáveis tenderam a ter um aumento relevante antes da ocorrência da chuva e posteriormente uma estabilização, em torno de um valor significativo, à medida que a precipitação ocorre. A segunda característica destacada durante as análises é em relação ao comportamento temporal dos índices K e TT, após a chegada dos sistemas de grande escala chuvosos estudados, quando comparado com casos de sistemas de tempestades de caráter mais isolado estudados por outros autores. Nos casos aqui

estudados, como mencionado, após o início da chuva, os valores de K e TT caíram suavemente e estabilizaram em torno de um valor significativo, o que mostra uma diferença marcante e interessante de comportamento dessas variáveis em relação a sistemas de tempestades em escala menor. A terceira característica ressaltada durante as análises de cada indicador nos casos estudados nessa pesquisa foi a distribuição espacial e permanência de valores significativos dos indicadores K, TT, água precipitável, umidade específica em 850hPa e energia disponível para a formação de tempestades em 500hPa sobre o MRJ à medida que a precipitação ocorria nos casos de chuva severa. Essa distribuição espacial mostra que nos dias em que as condições atmosféricas eram favoráveis à ocorrência de altos acumulados de precipitação, esses indicadores adquiram valores significativos que se estendem do continente até o oceano, e esse padrão parece estar relacionado com uma “alimentação” mais contínua para o desenvolvimento dos sistemas convectivos, do que o padrão apresentado nos casos de chuvas fracas.

Carmo *et al* (2019) analisam o comportamento de alguns índices de instabilidade para diferentes taxas de precipitação utilizando dados SYNOP (1996 a 2014), provenientes de estações meteorológicas das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, para as quais também estavam disponíveis os dados das sondagens atmosféricas. Os dados coletados nesse trabalho foram categorizados em três intervalos de classe de interesse de acordo com os registros dos acumulados pluviométricos: acima de 60 mm/dia (classe 1 – chuva intensa), entre 60 mm/dia e 5 mm/dia (classe 2 – chuva moderada) e abaixo de 5 mm/dia (classe 3 – chuva fraca/não chuva). Foram calculados cinco índices de instabilidade para as três classes de precipitação. Os índices K, TT e Severe Weather Threat (SWEAT) se destacaram como bons indicadores nos casos de chuvas moderadas a intensas (classes 1 e 2). Os índices Lifted Index (LI), Índice Showalter (IS) e Convective Potential Available Energy (CAPEv), entretanto, não caracterizam bons resultados para os eventos de chuva analisados (associados com sistemas frontais). A análise combinada entre os índices K, TT e SWEAT também se mostrou eficiente como um indicador atmosférico para a ocorrência de chuvas moderadas a intensas.

Hassan *et al* (2017) realizaram um estudo para caracterizar e entender o ambiente sinótico e de mesoescala associado à formação da tempestade que originou o tornado de Xanxerê – SC. Nesse trabalho os autores utilizaram dados de umidade relativa, movimento vertical (ômega) e vento da reanálise do ERA INTERIM, com resolução espacial de 50 km. Foi realizado um experimento teste de modelagem numérica em alta resolução, utilizando o modelo de mesoescala Brazilian developments on the Regional

Atmospheric Modelling System (BRAMS), visando encontrar alguns aspectos preliminares do ambiente em mesoescala associado ao tornado de Xanxerê. Os resultados mostraram que os ambientes sinóticos e de mesoescala foram favoráveis à formação e desenvolvimento de tempestades severas com potencial para formação de tornados sobre grande parte do oeste de Santa Catarina, principalmente próximo ao município de Xanxerê. Em relação aos índices termodinâmicos, nota-se que a energia potencial convectiva disponível (CAPE), responsável por elevar a parcela de ar, quando a mesma ultrapassa o nível de convecção espontânea, aumenta de forma intensa ao longo das horas, passando de 622 J/ Kg às 12 UTC até atingir 1028 J/Kg às 18 UTC. O índice de levantamento (LI) permanece negativo (menor que $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) para todas as horas em estudo, denotando uma camada instável durante as horas que antecederam o evento. O índice K se manteve alto (maior que $24\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante as horas de atuação do SCM devido a camada seca se apresentar próxima ao nível de 500 hPa e não no nível de 700 hPa. O índice TT também se manteve alto (maior que $45\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante as horas que antecederam ao evento e o índice LI se manteve negativo para os mesmos horários. Conclui-se que o índice K não foi relevante nesse estudo para classificar a tempestade como severa, sendo que a secagem em médios níveis (500 hPa) foi um fator importante que junto aos valores de TT alto e LI negativos, forneceram as condições termodinâmicas necessárias para uma atuação e classificação de uma tempestade com ventanias fortes.

3 Dados e Metodologia

Neste capítulo são apresentados os dados observacionais e as metodologias utilizadas para desenvolver as climatologias da precipitação e de ECIs no MRJ e para elaboração do estudo de caso do ECI ocorrido em 15 de fevereiro de 2018.

3.1 Elaboração das climatologias da precipitação e de ECIs no MRJ

Para elaboração das climatologias da precipitação e de ECIs no MRJ são utilizados os dados de precipitação do Sistema Alerta Rio. Os dados dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio são disponibilizados através do sítio <http://alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/> e as informações técnicas de cada posto pluviométrico estão disponíveis em <http://alertario.rio.rj.gov.br/info-estacoes/>. Os dados são considerados de boa qualidade, uma vez que passam por um controle e existe uma equipe 24 horas disponível para verificação e manutenção dos postos pluviométricos.

A distribuição espacial dos postos pluviométricos é apresentada na Figura 1.1. Nota-se uma distribuição não homogênea das estações, com a maior parte dos postos concentrada próximo ao Maciço da Tijuca, e poucas na Zona Oeste (ZO) da cidade. Isso ocorre devido ao interesse da instituição no monitoramento das áreas de risco de deslizamento no município. Por exemplo, no Maciço da Pedra Branca seria interessante a presença de um posto pluviométrico na região mais elevada (em torno 1000 m de altitude) para melhor representação do máximo de precipitação que provavelmente ocorre na região. Contudo, como a região é uma área de preservação ambiental, o risco de desastres naturais é menor do que em áreas densamente povoadas, como por exemplo nas áreas próximas ao Maciço da Tijuca.

A precipitação dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio é totalizada a cada 15 minutos, aqui denominada *chv15min*, considerando o horário local e ainda considerando o Horário Brasileiro de Verão (HBV). Dessa forma, inicialmente, para elaboração da climatologia, as séries de dados são ajustadas do HBV para horário local. Os totais pluviométricos diários (*chv24h*) são acumulados neste trabalho desde 00:15 h até 00:00 do dia seguinte. Dessa forma, para cada dia existem 96 registros de *chv15min*.

Os totais pluviométricos diários são calculados apenas quando o número de falhas nos registros de *chv15min* é inferior a 20%, ou seja, quando ocorrem no máximo 19

registros faltosos. No caso dos totais pluviométricos mensais, esses são calculados para os meses em que a quantidade de falhas é inferior a 20%. Ou seja, num mês de 30 dias (contendo 2880 registros de chv15min), o total pluviométrico mensal só é calculado quando existem no mínimo 2304 registros de chv15min. Os meses excluídos das análises em cada posto pluviométrico estão apresentados na Tabela 3.1.

Assim como em Lima *et al.* (2010), neste trabalho não foi feito nenhum tipo de interpolação ou preenchimento de dados faltantes, pois como a precipitação é uma variável descontínua, tanto no tempo quanto no espaço, tais processos poderiam resultar em dados não confiáveis.

Os totais pluviométricos mensais e anuais de cada posto pluviométrico são calculados e utiliza-se média aritmética simples para estabelecer a climatologia de 20 anos (1997-2016) no MRJ. Para elaboração dos resultados sazonais, considera-se neste trabalho o verão como sendo os meses de dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), outono março-abril-maio (MAM), inverno junho-julho-agosto (JJA) e primavera setembro-outubro-novembro (SON). Além disso, em todo o trabalho, considera-se dias úmidos como dias nos quais o total pluviométrico diário é igual ou superior a 1 mm/dia.

Os postos pluviométricos utilizados para elaboração da climatologia da precipitação e de ECIs são apresentados na Tabela 3.1. Como as extensões das séries temporais dos postos pluviométricos não são idênticas, as mesmas foram distribuídas em três grupos:

- I) 26 estações com 20 anos de dados e que permanecem em operação até os dias atuais, destacadas em negrito;
- II) 2 estações com 16 anos de dados e que também permanecem em operação até os dias atuais (Laranjeiras e São Cristóvão), sublinhadas;
- III) As estações Gericinó, Mendanha e Sumaré (com 13 anos de dados) e Itanhangá (com 16 anos de dados), em itálico, que apesar de estarem desativadas, localizavam-se em áreas importantes para descrição da climatologia da região, próximas ou sobre os maciços da cidade.

Tabela 3.1 – Informações sobre os postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho. Os postos estão divididos nos Grupo I (em negrito), II (sublinhados) e III (itálico).

Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de Dados		Meses excluídos (n° dias excluídos)
				Início	Término	
Anchieta	-22,83	-43,40	50	01/01/1997	31/12/2016	set/1997 e jan/2001 (33 dias)
Bangu	-22,88	-43,47	15	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (21 dias)
Campo Grande	-22,90	-43,56	30	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e jun/2008 (48 dias)
Cidade de Deus	-22,95	-43,36	15	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (21 dias)
Copacabana	-22,99	-43,19	90	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (22 dias)
<i>Gericinó</i>	-22,89	-43,58	0	04/01/1997	12/05/2010	jan/2001 e mai/2010 (39 dias)
Grajau	-22,92	-43,27	80	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (20 dias)
Grande Méier	-22,89	-43,28	25	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (25 dias)
Grota Funda	-23,01	-43,52	11	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e abr/2005 (40 dias)
Guaratiba	-23,05	-43,59	0	01/01/1997	31/12/2016	nov/1997, jan/2001 e abr/2005 (55 dias)
Ilha do Governador	-22,82	-43,21	0	02/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e mar a dez/2002 (196 dias)
Irajá	-22,83	-43,34	20	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (33 dias)
<i>Itanhangá</i>	-23,00	-43,30	80	02/01/1997	08/01/2013	jan/2001 e jan/2013 (35 dias)
Jardim Botânico	-22,97	-43,22	0	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (19 dias)
<u>Laranjeiras</u>	-22,94	-43,19	60	13/08/2000	31/12/2016	ago/2000 e jan/2001 (27 dias)
Madureira	-22,87	-43,34	45	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e set/2006 (48 dias)
<i>Mendanha</i>	-22,82	-43,52	736	01/01/1997	31/03/2010	jan/2001 e abr/2010 (25 dias)
Penha	-22,84	-43,28	111	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (21 dias)
Piedade	-22,89	-43,31	50	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (26 dias)
Recreio dos Bandeirantes	-23,01	-43,44	10	01/01/1997	31/12/2016	jan/1997 e out/2000 e jan/2001 (44 dias)
Riocentro	-22,98	-43,41	0	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e abr, mai, jun/2005 (89 dias)
Rocinha	-22,99	-43,25	160	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (22 dias)
Santa Cruz	-22,91	-43,68	15	01/01/1997	31/12/2016	set/1997, jan/2001 e mar/2007 (51 dias)
Santa Teresa	-22,93	-43,20	170	01/01/1997	31/12/2016	jan e set/2001 (49 dias)
<u>São Cristóvão</u>	-22,90	-43,22	25	19/08/2000	31/12/2016	ago/2000, jan/2001, mar a dez/2002, set/2003, jun/2004, fev/2005 (258 dias)
Saúde	-22,90	-43,19	15	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (20 dias)

Tabela 3.1 – Fim.

Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de Dados		Meses excluídos (nº dias excluídos)
				Início	Término	
Sepetiba	-22,97	-43,71	62	01/01/1997	31/12/2016	jan e set/1997 e jan/2001 (45 dias)
Sumaré	-22,95	-43,24	768	03/01/1997	16/04/2010	jan/2001 e abr/2010 (44 dias)
Tanque	-22,91	-43,36	73	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (23 dias)
Tijuca	-22,93	-43,22	340	02/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (27 dias)
Urca	-22,96	-43,17	90	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (19 dias)
Vidigal	-22,99	-43,23	85	01/01/1997	31/12/2016	jan e nov/2001 (48 dias)

3.1.1 Critério de Identificação de ECI

Inicialmente para cada posto pluviométrico foram calculados os percentis 75, 90, 95 e 99 da chv24h e também da chv15min, para todas as séries de dados dos 32 postos pluviométricos no MRJ. A estimativa dos percentis é baseada apenas nos registros em que a precipitação é diferente de 0 mm, ou seja, excluem-se os registros sem chuva, assim como calculado por Karl e Knight (1998).

Cinco classes de precipitação são definidas, a partir das análises dos dados adaptando-se limares de Groisman *et al.* (2005): fraca (< percentil 75); moderada (\geq percentil 75 e < percentil 90); moderadamente intensa (\geq percentil 90 e < percentil 95); intensa (\geq percentil 95 e < percentil 99) e muito intensa (\geq percentil 99).

Os ECIs são selecionados analisando-se chv24h e chv15min. Para cada um dos postos pluviométricos do Alerta Rio, toda vez que chv24h é igual ou ultrapassa seu percentil 95, investiga-se se no mesmo dia existe algum registro de chv15min igual ou superior a seu percentil 95. Em caso afirmativo, considera-se que na data estudada houve ocorrência de um ECI. Usando essa definição baseada em percentis, no lugar de estabelecer limiares fixos, os ECIs podem ser simultaneamente encontrados em vários limares, dependendo da localização da estação (Groisman *et al.*, 2001). O limiar de percentil 95 foi escolhido de forma que os eventos selecionados sejam relativamente raros, porém não extremamente raros, como observado quando o percentil 99 é utilizado.

O interesse neste trabalho são os ECIs capazes de deflagrar transtornos na cidade, incluindo perdas de propriedades e de vidas humanas. A metodologia proposta para

identificação de ECIs é testada para o ano de 2016 a partir da comparação entre registros de transtornos (alagamentos, inundações e deslizamentos) reportados ao Centro de Operações Rio (COR) e noticiados nos principais veículos de comunicação, com os dados de chuva do Sistema Alerta Rio. A partir dos resultados obtidos, apresentados na Seção 4.1, elaborou-se uma tabela de contingência (Tabela 3.2), sendo: A) Caso identificado a partir do critério proposto, sendo confirmado transtornos na cidade; B) Caso identificado a partir do critério proposto, porém sem ocorrência de transtornos na cidade; C) Caso não identificado a partir do critério proposto, porém com ocorrência de transtornos na cidade e D) Caso não identificado a partir do critério proposto e sem ocorrência de transtornos na cidade.

Tabela 3.2 – Modelo de tabela de contingência para avaliação dos ECIs ocorridos no MRJ.

		Observado		
		Sim	Não	TOTAL
Identificado a partir do critério proposto	Sim	A	B	A+B
	Não	C	D	C+D
	TOTAL	A+C	B+D	N=A+B+C+D

A partir da contabilização dos casos, as métricas de avaliação: Acerto (AC), Alarme Falso (AF), Viés (VIES), Probabilidade de Detecção (POD) e Índice Crítico de Sucesso (TS) são calculadas, de acordo com Wilks (2006):

$$AC = \frac{A+D}{N} \quad (3.1)$$

$$AF = \frac{B}{A+B} \quad (3.2)$$

$$VIES = \frac{A+B}{A+C} \quad (3.3)$$

$$TS = \frac{A}{A+B+C} \quad (3.4)$$

$$POD = \frac{A}{A+C} \quad (3.5)$$

Numa situação ideal, AC, POD e TS devem apresentar valores o mais elevado possíveis (próximo a 1), AF o menor valor possível (próximo a 0) e o VIES igual a 1, indicando que o número de eventos previstos é igual ao número de eventos observados.

A partir da validação do método proposto, foram elaborados mapas e gráficos para verificar o comportamento dos ECI no MRJ.

3.2 Dados Observados e Metodologia para o Estudo de Caso

3.2.1 Reanálise CFSRv2

Para elaboração do estudo de caso de 15 de fevereiro de 2018 foram utilizados conjuntos de dados do *Climate Forecast System Reanalysis*, na sua versão 2 (CFSRv2 - Saha *et al.*, 2014), provenientes do NCEP, disponíveis em https://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/cfsv2_analysis_pgbh/. As variáveis diagnósticas do CFSRv2 utilizadas neste trabalho possuem resolução horizontal de 0,5° e resolução temporal de 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC).

Os campos foram confeccionados para o período de 13 a 15 de fevereiro, a cada 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC). As variáveis utilizadas são: PNMM, componentes zonal e meridional do vento, altura geopotencial e umidade específica nos níveis de pressão de 1000, 850, 700, 500, 300 e 250 hPa. A partir de tais dados foram elaborados campos de: i) PNMM (hPa) e Espessura da camada 1000-500 (mgp); ii) Altura geopotencial (mgp) e Linha de corrente no nível de 200 hPa; e iii) Fluxo de umidade verticalmente integrado ($\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) na camada 1000-300 hPa.

O fluxo de umidade verticalmente integrado (Q) é calculado a partir da Equação 3.6:

$$Q = \frac{-1}{g} \int_{p_1}^{p_2} (uq + vq) \Delta p \quad (3.6)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade

p = pressão atmosférica

u = componente zonal da velocidade do vento

v = componente meridional da velocidade do vento

3.2.2 Precipitação

Dados de precipitação dos 33 postos pluviométricos em funcionamento atualmente no Sistema Alerta Rio e o *Software* ARCGIs foram utilizados para confeccionar os mapas com os acumulados de precipitação. Para distribuição espacial da precipitação, foi utilizado o método de interpolação *Inverse distance weighting* (IDW). O IDW um tipo de método determinístico para interpolação multivariada com um conjunto conhecido de pontos dispersos. Os valores atribuídos aos pontos desconhecidos são calculados com uma média ponderada dos valores disponíveis nos pontos conhecidos. O nome dado a este tipo de

métodos foi motivado pela média ponderada aplicada, uma vez que recorre ao inverso da distância a cada ponto conhecido ("quantidade de proximidade") ao atribuir pesos.

3.2.3 Imagens de Satélite

As imagens de satélite utilizadas neste trabalho são provenientes do canal 14 (11.2 μ - infravermelho) do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-16), obtidas no acervo de imagens do sítio da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. (CPTEC)/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>.

3.2.4 Imagens de Radar

Foram utilizadas imagens a cada 15 minutos do radar meteorológico do Sumaré, que é um radar do tipo banda-C e está localizado no alto da Serra da Carioca, dentro do Parque Nacional da Tijuca. Sua operação teve início em dezembro de 2010 e atualmente é operado pelo Sistema Alerta Rio, diretamente do COR. A base do radar está a uma altitude de 695,51 metros e suas coordenadas de localização são: Latitude: 22° 57' 18,5"S e Longitude: 43° 14' 53,8"W.

3.2.5 Cartas Sinóticas

Para posicionamento dos sistemas meteorológicos atuantes na região de estudo, são utilizadas cartas de PNMM do Serviço Meteorológico Marinho da Marinha do Brasil (SMM-MB). Tais cartas estão disponíveis no sítio <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>. Cartas sinóticas entre os dias 13 e 15 de fevereiro de 2018 nos horários de 00 e 12 UTC foram utilizadas.

3.2.6 Dados de Aeródromos

Foram utilizados dados de METAR dos aeródromos de Santa Cruz, Santos Dumont e do Galeão, pertencente à Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). Foram utilizados os dados de altitude do aeródromo do Galeão para confeccionar os diagramas Skew-T.

3.3 Modelo Regional Eta

Para simulação do ECI do dia 15 de fevereiro de 2018, foram realizadas integrações com o modelo regional Eta. O modelo Eta é um sistema de equações primitivas, sua grade é do tipo E de Arakawa e sua topografia é representada em forma de degraus (Mesinger, 1984). O modelo Eta (Mesinger *et al.*, 2012) foi desenvolvido na Universidade de Belgrado em parceria com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia tornando-se operacional no NCEP no início da década de noventa (Mesinger *et al.*, 1988; Black, 1994). Esse modelo foi utilizado pelo CPTEC/INPE a partir de 1996, com a finalidade de complementar a previsão numérica de tempo. O modelo regional Eta se propõe a prever com maiores detalhes sistemas organizados em mesoescala tais como: sistemas convectivos, frentes, brisa marítima, tempestades severas, circulações locais, entre outros (Chou, 1996). Uma particularidade do modelo Eta constitui-se da utilização da coordenada vertical Eta (η). O uso dessa coordenada é adequado para regiões de topografia íngreme, tendo em vista que a coordenada vertical foi baseada em superfícies aproximadamente horizontais. Com essa coordenada a topografia é representada na forma de degraus discretos, o que contribui para a redução dos erros nos cálculos obtidos de derivadas horizontais, tais como aqueles relacionados com a força do gradiente horizontal de pressão. A coordenada η (Equação 3.7) é definida como (Mesinger, 1984):

$$\eta = \underbrace{\left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right)}_{\eta_s} \underbrace{\left[\frac{p_{ref}(z_{ref}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right]}_{\sigma} \quad (3.7)$$

onde:

p = pressão ao nível médio do mar igual a 1013.25hPa

p_T = pressão no topo do domínio

p_{sfc} = pressão à superfície

z_{ref} = elevação do relevo

p_{ref} = pressão de referência (função da elevação acima do nível do mar)

A resolução vertical é maior nos baixos níveis e diminui com a altura; a primeira camada tem 20 metros de espessura. Um máximo secundário ocorre próximo à tropopausa para melhor descrever a inversão térmica em altos níveis. O modelo possui representação complexa dos processos físicos que são tratados através de esquemas de parametrização.

Para a parametrização de radiação de onda curta e onda longa são utilizados os esquemas de Lacis e Hansen (Lacis e Hansen, 1974) e Fels e Schwarzkopf (Fels e

Schwarzkopf, 1975), respectivamente. A superfície terrestre é parametrizada pelo esquema de Noah (Chen *et al.*, 1997). Os processos turbulentos na atmosfera livre são resolvidos pelo esquema de Mellor-Yamada nível 2.5 (Mellor e Yamada, 1982) e na camada superficial através das funções de estabilidade de Paulson (Paulson, 1970).

No caso da precipitação, seu cálculo é obtido através de duas parametrizações diferentes: microfísica e convectiva. A chuva estratiforme está relacionada à microfísica, ou seja, ao movimento horizontal das partículas de ar e sua saturação, quando há convergência de umidade suficiente. A microfísica é resolvida pelo esquema de Ferrier (Ferrier *et al.*, 2002) e Zhao (Zhao e Carr, 1997). Por outro lado, a precipitação convectiva originada de cumulus e cumulonimbus (Cb) e está relacionada principalmente ao movimento vertical de massas de ar e sua condensação da água por expansão adiabática. Diferentes tipos de precipitação geram diferentes perfis de calor latente na atmosfera, o que implica em diferentes resultados nas escalas de tempo e clima. O modelo apresenta duas parametrizações cúmulos: Betts-Miller-Janjic (BMJ - Janjic, 1994) e Kain-Fritsch (KF - Kain e Fritsch, 1993).

3.3.1 Simulações do ECI

Neste trabalho, foram realizadas 4 simulações, com saídas horárias, utilizando o modelo Eta, com grade horizontal de 1 km, domínio sobre o ERJ e 38 camadas verticais. As condições iniciais e de contorno para construção dos membros do conjunto são provenientes do CFSRv2 com resolução de 50 km. Na Figura 3.1, é apresentado o domínio das simulações, com ponto central em 22,51°S e 042,51°W com 499 pontos na direção x e 199 pontos na direção y (Figura 3.1a), e uma ampliação da figura anterior sobre o MRJ (Figura 3.1b).

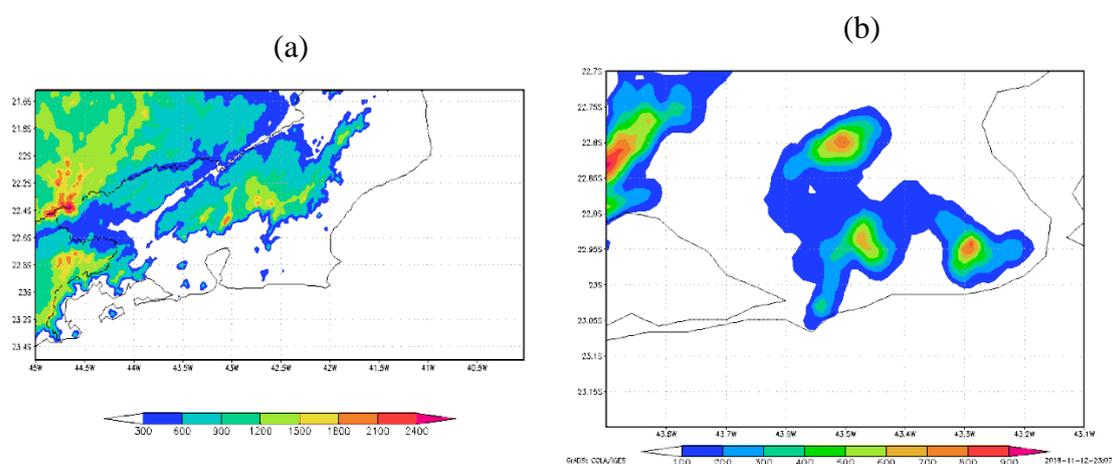


Figura 3.1 – Topografia (metros) do domínio das simulações com resolução horizontal de (a) 1 km e (b) recorte no MRJ.

As simulações foram iniciadas a partir de 0000 UTC do dia 13 de fevereiro de 2018, com duração de 72 horas. As parametrizações convectiva e de microfísica de nuvens de cada membro são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parametrizações utilizadas nas simulações com modelo Eta-1km.

SIMULAÇÕES (Membros)	PARAMETRIZAÇÕES	
	CONVECTIVA	MICROFÍSICA DE NUVENS
BMJ_FER	Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994)	Ferrier (Ferrier <i>et al.</i> , 2002)
BMJ_ZHAO		Zhao (Zhao e Carr, 1997)
KF_FER	Kain-Fritsch (Kain e Fritsch, 1993)	Ferrier (Ferrier <i>et al.</i> , 2002)
KFMX_FER	Kain-Fritsch com inclusão de Fluxo de Momentum (Gomes e Chou, 2010)	

A parametrização convectiva BMJ (Janjic, 1994) é um esquema de ajuste convectivo baseado no conceito de *lapse-rate* atmosférico. Essa parametrização utiliza um perfil termodinâmico de referência para representar a estrutura vertical em situações de instabilidade convectiva. O perfil de temperatura e umidade é ajustado de acordo com o perfil de referência construído a partir de três parâmetros: déficit de pressão de saturação (determina o perfil de umidade); coeficiente de estabilidade (determina o *lapse-rate* da temperatura) e o tempo de ajuste convectivo (tempo de relaxação para remoção da instabilidade).

A parametrização convectiva KF (Kain e Fritsch, 1993) é um esquema do tipo fluxo de massa lagrangeano, que simula o entranhamento e desentranhamento nas correntes convectivas para permitir uma interação entre a nuvem e o ambiente. A parametrização KF possui três partes fundamentais: i) A função de gatilho, que identifica as camadas potencialmente instáveis para convecção e calcula a flutuabilidade da parcela; ii) A formulação do fluxo de massa, que representa os fluxos convectivos ascendentes e descendentes e iii) O fechamento, que redistribui a massa na coluna reduzindo a Energia Potencial convectiva disponível para convecção (*Convective Available Potential Energy* - CAPE) inicial.

Nas integrações realizadas dos membros com parametrização KF, foi incluído um parâmetro que controla o quanto de água líquida/gelo das nuvens é convertido em precipitação e o quanto permanece no ponto de grade do modelo como gota/gelo da nuvem, conforme proposto por Gomes e Chou (2010). Essa modificação é feita com o intuito de se ajustar a produção de precipitação em mesoescala. A inclusão do transporte de momentum convectivo (TMC) no esquema KF (KFMX) considera os efeitos da corrente ascendente e descendente sobre o cálculo do vento, que permitem a interação entre a nuvem e o ambiente, conservando massa, calor e momentum (Carvalho, 2007).

O esquema de microfísica de nuvens Zhao (Zhao e Carr, 1997) apresenta como característica principal a previsão de conteúdo de gelo ou água na nuvem como uma única variável preditiva, a razão de mistura, que representa ambas. Dessa forma, o conteúdo de vapor d'água na nuvem, que envolve a formação e evaporação de nuvens e de precipitação, é calculado de forma explícita. Esse método permite uma melhor representação dos efeitos termodinâmicos de condensação em subgrade (precipitação e não precipitação), assim como uma relação mais estreita entre os processos radiativos, dinâmicos e hidrológicos no modelo.

O esquema de microfísica das nuvens de Ferrier (Ferrier *et al.*, 2002) foi formulado para prever a variação de seis formas da água, representando assim a nuvem e a chuva da escala de grade do modelo. Além disso, o esquema considera diversos processos microfísicos da água na nuvem com interações entre as partículas de água da nuvem, cristais de gelo e água precipitável. O esquema prevê mudanças na umidade específica do vapor d'água e possui algoritmos de condensação do vapor, fluxo de precipitação e armazenamento da água na nuvem. Essa parametrização gera precipitação na forma de chuva, chuva congelada e gelo, levando em consideração os processos de mistura de fases, congelamento e derretimento.

3.4 Índices de Instabilidade Atmosférica

3.4.1 Índice K

O índice K (George 1960) é definido por:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (3.8)$$

Sendo que T e T_d representam respectivamente temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho.

O índice K é baseado na taxa vertical de variação de temperatura ou *lapse rate* para níveis baixos e médios (representado pelos dois primeiros termos da Equação 3.8), no conteúdo de umidade na baixa troposfera (representado pelo segundo termo da Equação 3.8) e no grau de subsaturação atmosférica em 700 hPa (último termo da equação). É possível interpretar os dois últimos termos de Equação 3.8 como a extensão vertical da camada úmida. Por isso esse índice é muito usado para avaliar chuvas fortes, pois a presença de uma camada úmida entre 850 e 700 hPa indica acentuado conteúdo de água líquida precipitável. De acordo com alguns estudos (Henry, 1987 e Nascimento, 2005), valores de K acima de 30°C têm alto potencial para ocorrência de tempestades, e acima de 40°C têm potencial extremo para tempestades. Segundo estudos realizados por George (1960), foram encontrados as seguintes relações entre valores do índice K e probabilidade de ocorrência de tempestades: Índice K entre 20 e 25 é pouco favorável à formação de tempestades; entre 26-29 existe 50% de probabilidade de formação de tempestades esparsas; entre 30 e 35 existe 80% de probabilidade de formação de tempestades severas e valores de K maiores de 36 existe a probabilidade de 100% de formação de tempestades severas. Entretanto, o índice K deve ser utilizado com cautela, pois uma camada seca em 700 hPa reduz os valores de K. Por isso, o ideal é analisá-lo em conjunto com outros índices.

3.4.2 Índice *Total Totals* – TT

Desenvolvido por Miller (1972), o índice Total-Totals (TT) é definido como:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500} \quad (3.9)$$

O TT indica a *lapse rate* de níveis baixos e médios, a oferta de umidade em 850 hPa, e a temperatura em 500 hPa. O índice TT requer calor e umidade em 850 hPa e ar frio em 500 hPa. Observa-se que se houver uma camada seca em 700 hPa isso não afeta TT. Valores de TT a partir de 40°C indicam situações favoráveis a tempestades, e valores acima de 50°C indicam chances de tempestades severas (Henry, 1987). Entretanto, analisar somente o TT para a previsão de chuvas convectivas não é suficiente, uma vez que uma *lapse rate* elevada entre níveis baixos e médios pode levar a um valor elevado mesmo sem o suporte de umidade em baixos níveis. Devido ao fato desse índice não levar em conta a umidade em níveis médios, ele isolado não é um bom indicador para ambientes favoráveis a tempestades com ventanias intensas.

3.4.3 Índice TTK

Silva e Dias (2000) nota-se que valores altos de TT aliados com valores baixos de K denotam um ambiente favorável à fortes ventanias e ocasionalmente situações de tempestades severas. Devido a esta combinação, Pereira (2015) introduziu em seus estudos a utilização do índice “TTK”, definido como a diferença algébrica entre os índices TT e K, isto é:

$$TTK = TT - K \quad (3.10)$$

Dessa forma, como explicado anteriormente, quando TTK apresentar altos valores, significa que a atmosfera apresenta forte instabilidade termodinâmica e uma condição de grande umidade em baixos níveis (como denotado por alto valor de TT) e além disso uma camada bem seca em 700 hPa (denotado por baixo valor de K).

Portanto se K e TT são altos a tendência é produzir tempestades com grande volume de chuvas. Se K é baixo e TT é alto então a tendência é ter tempestades severas com ventos fortes. Resumidamente, quanto maior o valor de TTK, maior potencial terá uma tempestade de produzir fortes correntes descendentes intensas.

3.4.4 Energia Potencial Convectiva Disponível – CAPE

A CAPE é obtida pela fórmula (Houze, 1993):

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

Onde: NCE é o nível de convecção espontânea e o NEL é o nível de equilíbrio ou nível de perda de empuxo da parcela; θ_v é a temperatura potencial virtual da parcela de ar e $\bar{\theta}_v$ é a temperatura potencial virtual do ambiente; o termo g é a aceleração da gravidade.

Quanto maior a diferença de temperatura entre a parcela de ar ascendente e o ambiente, maior será a CAPE, indicando um ambiente com potencial para gerar intensas acelerações ascendentes. Esse índice também pode apresentar valores significativos num ambiente com baixo NCE e alto NEL, sendo recomendado o uso de outros índices além da CAPE para identificar condições termodinâmicas favoráveis à convecção severa. Valores de CAPE entre 1000 e 2500 J/Kg são considerados altos; valores acima de 2500 J/Kg indicam instabilidade acentuada, e acima de 4000 J/Kg indicam instabilidade extrema.

3.4.5 Energia Total e Índice de Energia

Diversas variáveis meteorológicas, como campos de umidade, temperatura, altura geopotencial e velocidade, têm sido usados tanto isolados quanto combinados em várias formas em diversos trabalhos sobre tempestades e esquemas de previsão. Esses parâmetros, no entanto, podem ser combinados de uma maneira fisicamente consistente em termos de unidade de energia (Darkow, 1968). A Energia Total (ET) de uma massa de ar pode ser expressa como a soma da entalpia específica, energia potencial gravitacional, energia latente e energia cinética, respectivamente, onde C_p é o calor específico do ar a pressão constante, T é a temperatura, gZ é o geopotencial, q é a umidade específica e V é a velocidade escalar (Equação 3.12).

$$ET = C_p T + gZ + Lq + \frac{V^2}{2} \quad (3.12)$$

O termo da energia cinética é normalmente duas ordens de grandeza menor do que os outros termos e, portanto, pode ser negligenciado. Os três termos ($C_p T + gZ + Lq$) são chamados de “Energia Estática Úmida” (Kreitzberg, 1964 apud Darkow, 1968), ou “função sigma” (Kiefer, 1941 apud Darkow, 1968). Esses termos são conservativos em relação aos processos saturados e subsaturados e são diretamente proporcionais à temperatura potencial pseudo-equivalente e à temperatura potencial do bulbo úmido. Considerando a aproximação $q = w$ e $L = L_0$, onde w é a razão de mistura e L_0 , o calor latente de condensação, é possível expressar a energia estática como o produto de constantes físicas conhecidas por variáveis rotineiramente obtidas dos perfis atmosféricos. Sendo assim, dividindo a Equação 3.12 por C_p , obtêm-se os campos de temperatura potencial equivalente:

$$\theta_E = \frac{ET}{C_p} = T + \frac{L_0 w}{C_p} + \frac{gZ}{C_p} \quad (3.13)$$

Vale notar que como $C_p = 1005 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, a ET das tempestades, quando expressa em J/g, é essencialmente semelhante à temperatura potencial equivalente (K). Por serem conservativos em relação aos processos não saturados e saturados adiabáticos, a ET para formação de tempestades e sua temperatura potencial equivalente poderão ser empregados na análise de fenômenos convectivos da mesma maneira que outras variáveis concernentes à física das tempestades. Entretanto, o parâmetro ET tem a vantagem prática

de ser de fácil computação numérica porque não envolve uma dependência exponencial em níveis de pressão.

A Figura 3.2 mostra um modelo conceitual do perfil atmosférico de ET que tipicamente precede a formação de tempestades convectivas intensas, de acordo com Darkow (1968). Nos primeiros 100 hPa a partir da superfície, nota-se a presença da camada limite atmosférica (CLA), onde a energia é essencialmente uniforme em virtude da mistura promovida por turbulência convectiva e dinâmica em microescala. Acima da CLA, observa-se um decréscimo no valor de ET com a altura até atingir um mínimo em níveis médios, por volta de 550 hPa. Portanto, a camada entre o topo da CLA e os níveis médios nesses ambientes é potencialmente convectivamente instável. A partir desse último nível, os valores de ET voltam a aumentar gradativamente com a altitude, alcançando os patamares observados na baixa troposfera.

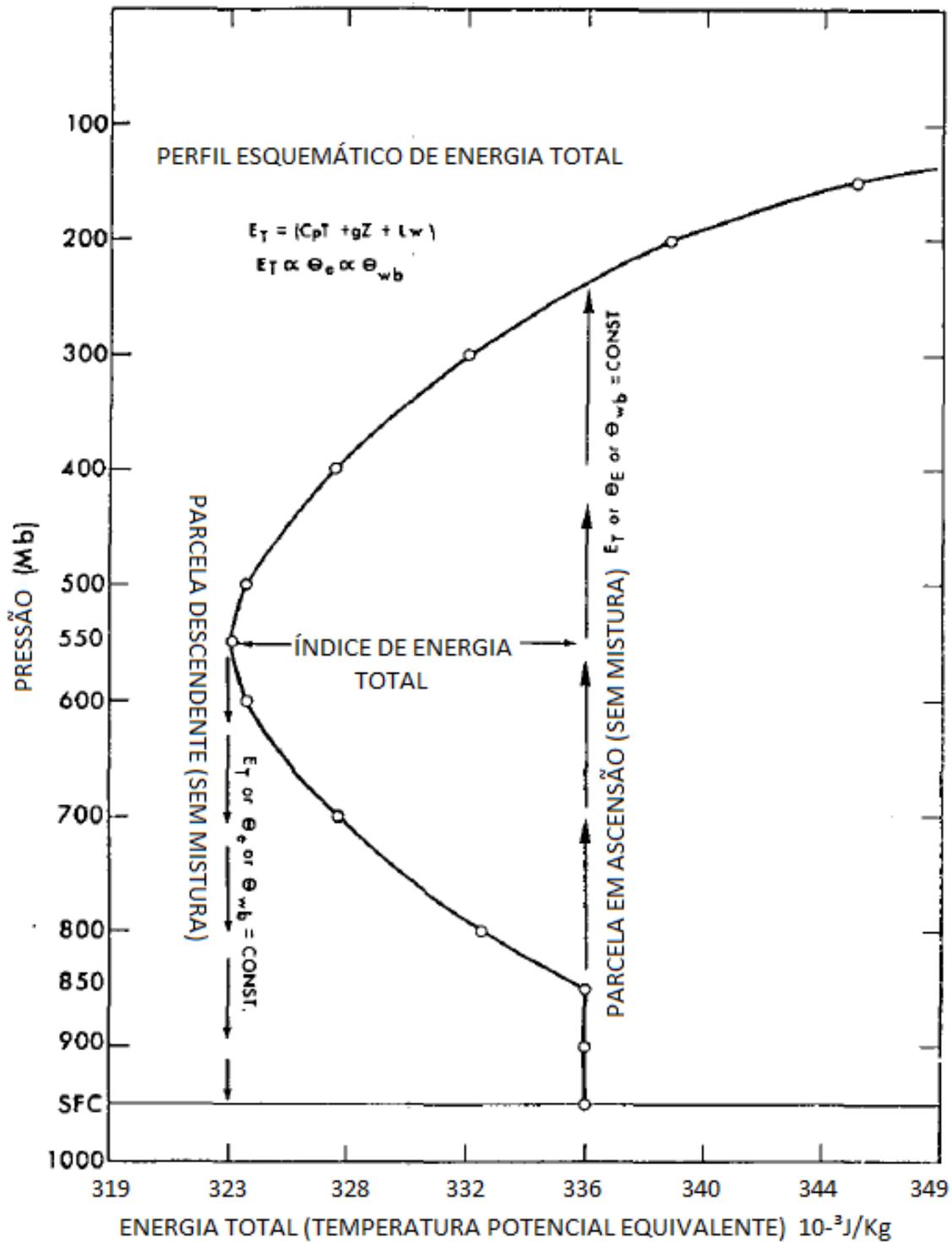


Figura 3.2 – Esquema do perfil atmosférico de ET em uma tarde antecedente ao disparo de tempestades convectivas severas. As flechas verticais indicam as trajetórias de parcelas em ascensão e/ou em subsidência, considerando a não ocorrência de entranhamento durante o processo. Fonte: Traduzido de Darkow (1968).

Ainda na Figura 3.2, estão esquematizadas as curvas de ascensão e subsidência de uma parcela de ar saindo, respectivamente, dos níveis de 850 hPa e 550 hPa, considerando a não ocorrência de entranhamento (o que permite a conservação da energia durante esse

processo). Assim, é possível verificar que quanto maior (mais negativa) for a diferença de ET entre níveis médios e baixos, maior será a contribuição das correntes ascendentes e descendentes para a intensificação da tempestade. Esse conceito é expresso por Darkow (1968) na forma de um IE, que se trata tão somente da diferença algébrica entre os valores de ET em 500 hPa e em 850 hPa (Equação 3.14).

$$IE = (ET_{500} - ET_{850}) \quad (3.14)$$

O estudo de Darkow (1968) verificou IE para diversos casos de tempestades convectivas significativas, entre os anos de 1966 e 1967, no Meio Oeste dos Estados Unidos. Seus resultados mostraram que em ambientes com valores de IE entre 0 e $-4,2 \times 10^{-3}$ J/kg, tempestades podem ocorrer, mas não de forma severa. Em ambientes com IE entre $-4,2$ e $-8,4 \times 10^{-3}$ J/Kg, é possível ocorrer tempestades severas isoladas, principalmente se estiverem integrando sistemas convectivos. Para valores de IE abaixo de $-8,4 \times 10^{-3}$ J/Kg, a ocorrência de tempestades severas e tornados mostrou-se bastante provável, desde que houvesse um mecanismo capaz de disparar a convecção.

4 Climatologias da precipitação e de ECIs no MRJ

Neste capítulo elabora-se uma climatologia de ECIs para o MRJ a partir das séries de 20 anos (1997-2016) de precipitação dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio. Inicialmente, na Seção 4.1, a climatologia da precipitação desenvolvida por DOM09 no MRJ é revisitada.

4.1 Climatologia da Precipitação no MRJ

A distribuição espacial da precipitação anual média sobre o MRJ é apresentada na Figura 4.1. Observa-se a presença de três máximos de precipitação associados aos maciços existentes no município. O maior e mais significativo máximo se localiza no Maciço da Tijuca, onde se verifica registros com valores máximos de 2546 mm por ano (Sumaré). Um segundo máximo de precipitação localiza-se junto ao Maciço de Gericinó com registros de precipitação em torno de 1589 mm/ano (Mendanha) e um terceiro é observado junto ao Maciço da Pedra Branca, com valores de até 1470 mm/ano (Grota Funda). Assim, como demonstrado em DOM09, as áreas de planícies apresentam registros de precipitação inferiores às regiões de relevo mais acidentado. Como exemplo, enquanto nos postos pluviométricos da Penha e Irajá observa-se valores em torno de 912 e 1005 mm/ano, respectivamente nos postos pluviométricos da Tijuca e Rocinha esses valores ficam em torno de 1517 e 1694 mm/ano. Assim como demonstrado em DOM09, as áreas de planície registram sempre valores anuais de precipitação inferiores às regiões de relevo mais acidentado, e destaca-se uma região de mínima precipitação na Zona Norte da cidade, com valores inferiores a 1000 mm anuais, onde está localizada a estação da Penha. Tais resultados mais uma vez confirmam que os valores máximos de precipitação ocorrem à barlavento das regiões montanhosas, levando-se em conta que os sistemas transientes de tempo que produzem precipitação deslocam-se, em sua maioria, de sul para norte, e considerando também a direção da brisa marítima que ocorre nesse sentido, como havia sido ressaltado em DOM09.

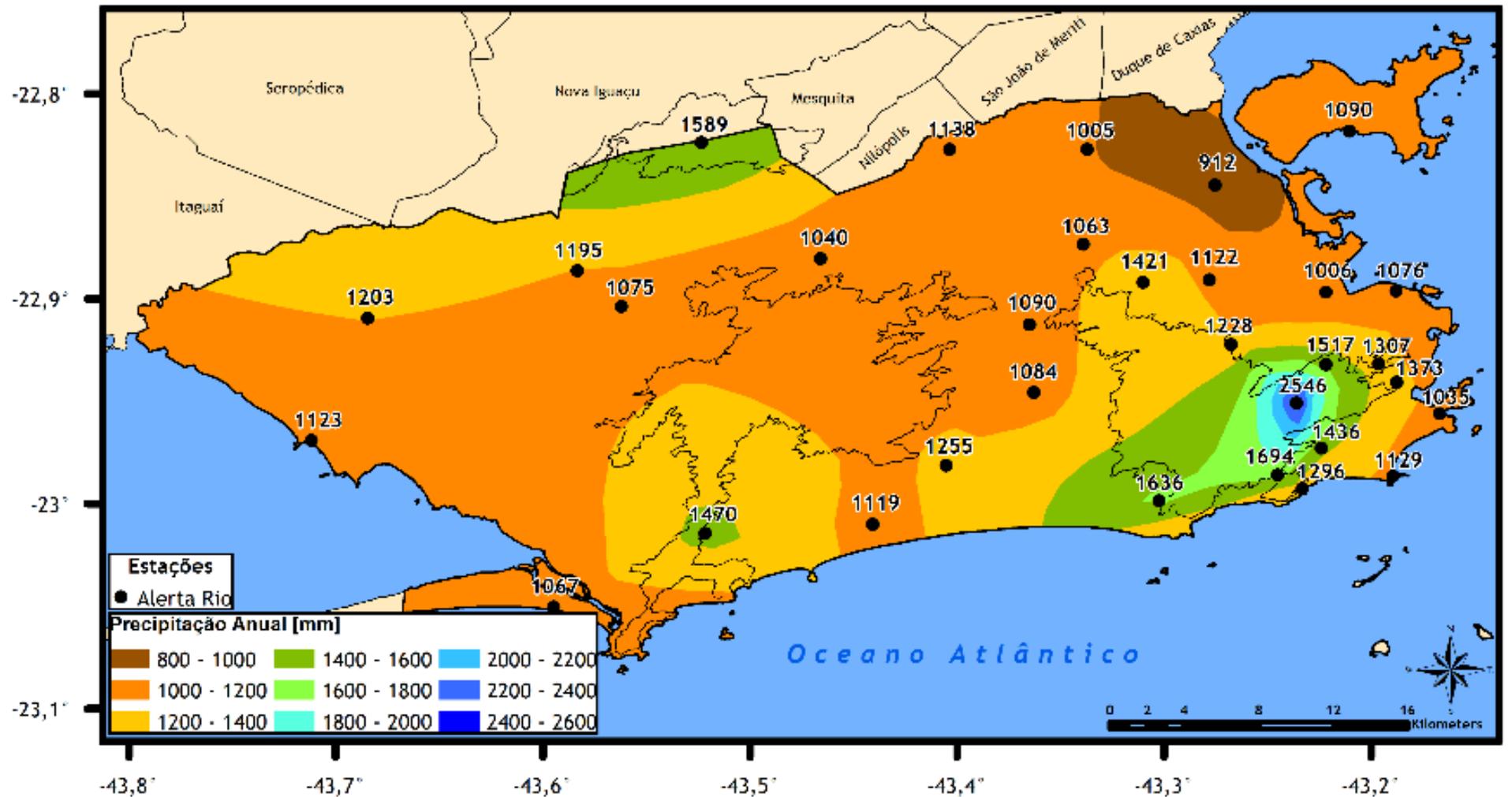


Figura 4.1 – Climatologia do total pluviométrico anual (mm/ano) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio.

A climatologia sazonal da precipitação é apresentada na Figura 4.2, onde os valores representam médias mensais em cada estação do ano.

No período de verão (Figura 4.2a), verifica-se a maior concentração da precipitação anual. São observados três máximos de precipitação sobre a cidade, sendo que o máximo principal, ocorre na estação do Sumaré (231 mm/mês). Nota-se um segundo máximo na estação de Mendanha (198 mm/mês) e um terceiro, menos intenso, na região do Maciço da Pedra Branca, com valor médio de 162 mm/mês, registrado na estação Grota Funda. A ocorrência de valores máximos ao norte da cidade nesta época está relacionada a ocorrência de precipitação de caráter convectivo (como exemplo, linhas de instabilidades na região Serrana e Sul Fluminense) que se deslocam para o MRJ. Os mínimos de precipitação são encontrados à sudeste do maciço da Tijuca, na Zona Sul do MRJ, com valores de 122 mm/mês (Copacabana) e 124 mm/mês (Urca). Este mínimo de precipitação está associado a diminuição de passagem de SFs sobre o MRJ durante o período.

No período do outono (Figura 4.2b), novamente o máximo de precipitação é localizado na região do Maciço da Tijuca, com os maiores valores registrados no posto do Sumaré (185 mm/mês). Um máximo secundário de precipitação é encontrado na região do Maciço da Pedra Branca, na estação Grota Funda (129 mm/mês). Por outro lado, são observados valores mínimos de precipitação localizados à nordeste do MRJ, nas estações de Irajá (75 mm/mês) e Penha (77 mm/mês).

Nos meses de inverno (Figura 4.2c) são observados os menores acumulados mensais. Verifica-se, mais uma vez, uma região de máximo de precipitação no Maciço da Tijuca (Sumaré – 149 mm/mês). Dois máximos secundários de precipitação são encontrados, um junto ao Maciço da Pedra Branca (77 mm/mês na estação da Grota Funda), e outro ao norte da cidade na estação Mendanha (70 mm/mês). No inverno, os mínimos valores são observados na estação da Penha (27 mm/mês) e Irajá (29 mm/mês).

Na primavera (Figura 4.2d), observa-se a maior média mensal registrada ao longo do ano, sendo o pico principal localizado no Maciço da Tijuca (Sumaré – 284 mm/mês). Um segundo máximo é observado no Maciço do Gericinó (estação Mendanha – 144 mm/mês) e outro no Maciço da Pedra Branca (estação Grota Funda – 123 mm/mês). Os mínimos de precipitação na primavera são registrados na Penha (69 mm/mês), seguido por Bangu (77 mm/mês) e Irajá (78 mm/mês).

Comparando a atual climatologia com DOM09, verifica-se neste trabalho valores médios de precipitação ligeiramente superiores próximos aos maciços do que encontrados anteriormente em DOM09. Porém, no restante da cidade, não ocorreram diferenças significativas entre as duas climatologias. Considerando-se todos os postos pluviométricos, no verão ocorrem os maiores acumulados de precipitação. A seguir destaca-se o outono como estação mais chuvosa, seguido da primavera e finalmente a estação menos chuvosa, o inverno.

Os totais pluviométricos médios mensais para cada posto pluviométrico estão apresentados no Apêndice I. Nota-se, em média, maiores valores de precipitação no mês de janeiro (184,4 mm/mês, com desvio padrão em torno de 26,8 mm/mês) e os menores valores de chuva no mês de agosto (44,2 mm/mês, com desvio padrão em torno de 23,9 mm/mês).

(a) Verão

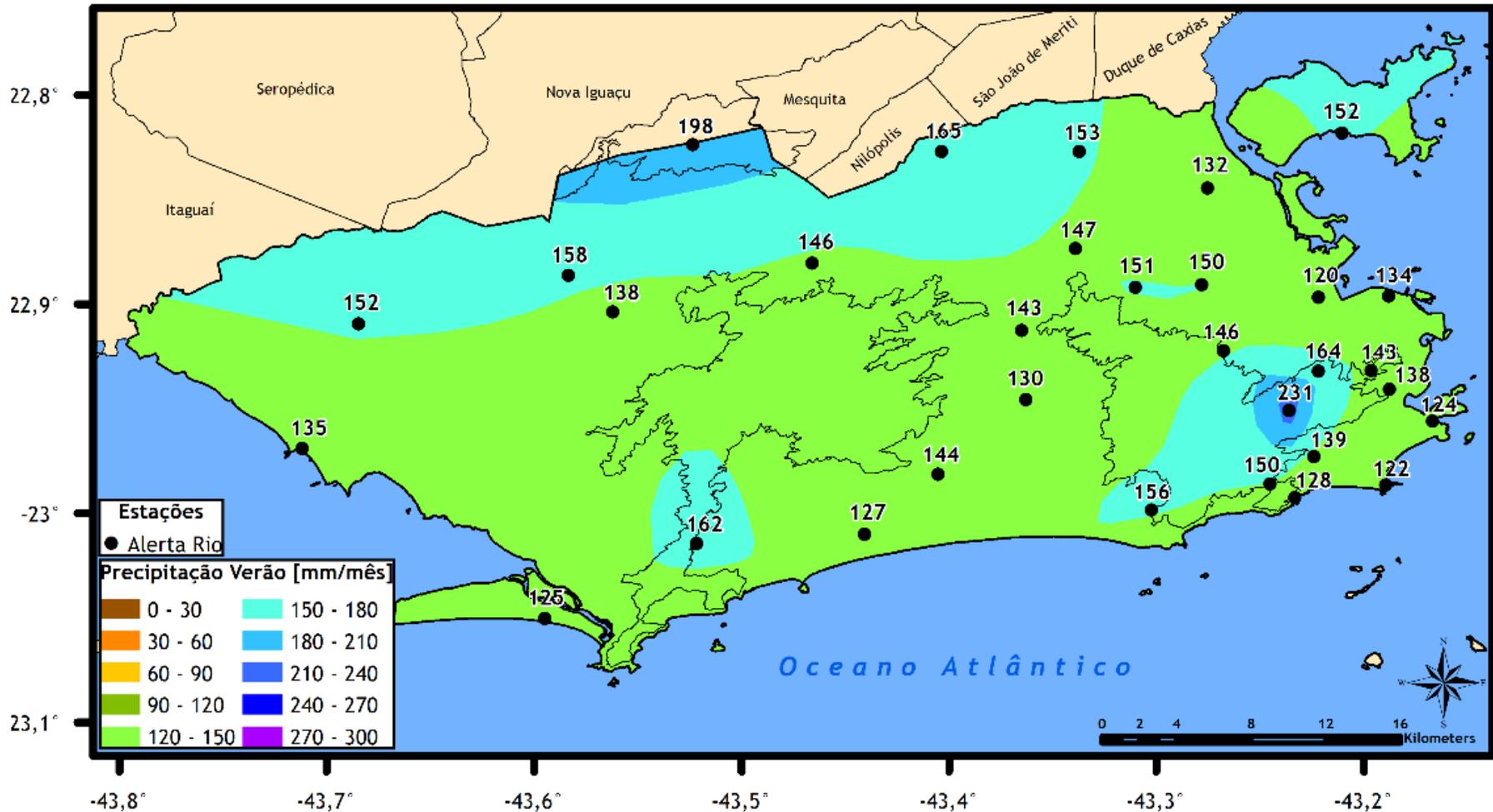
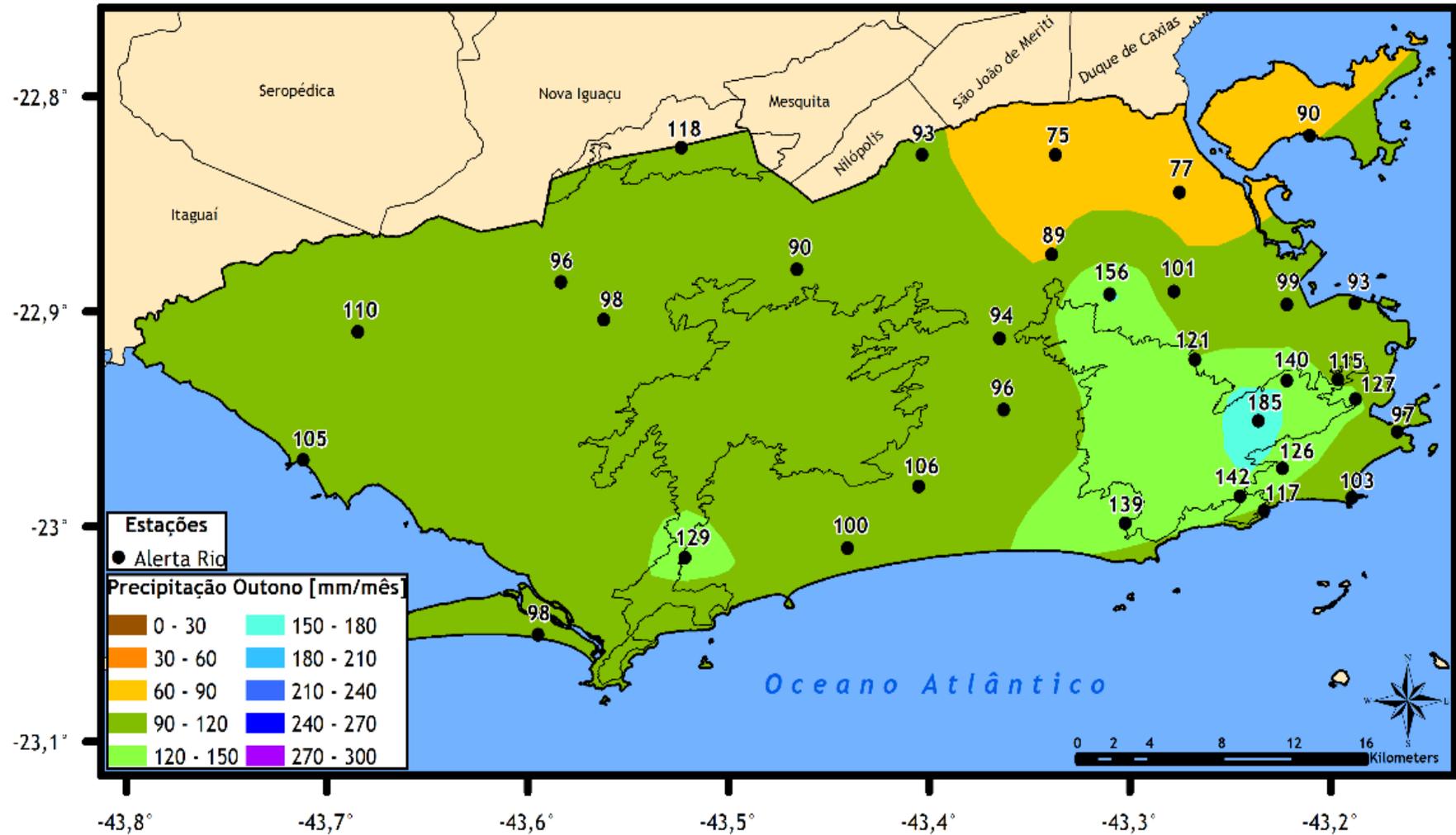


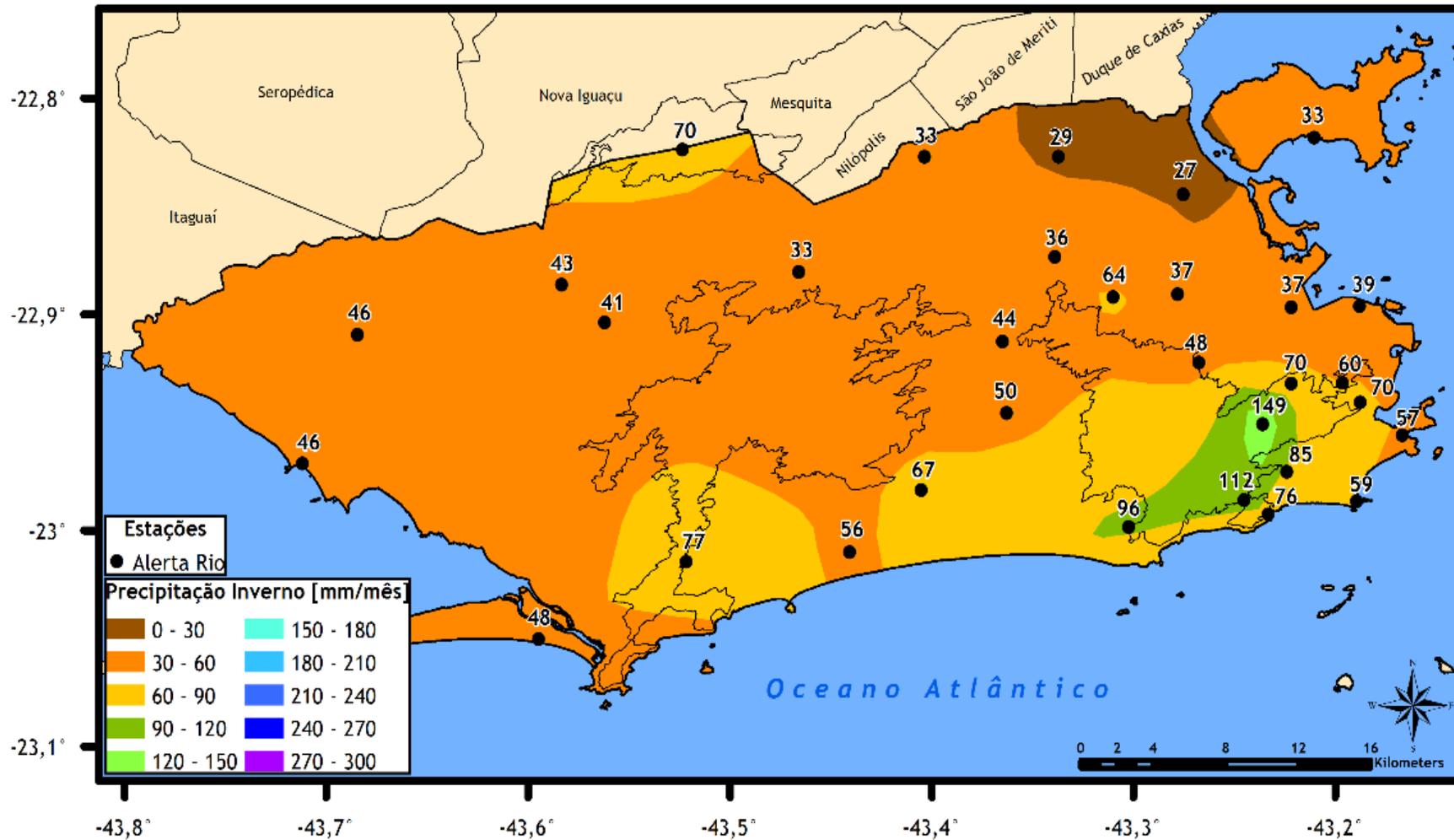
Figura 4.2 – Climatologia da precipitação média mensal (mm/mês) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno e (d) Primavera.

(b) Outono



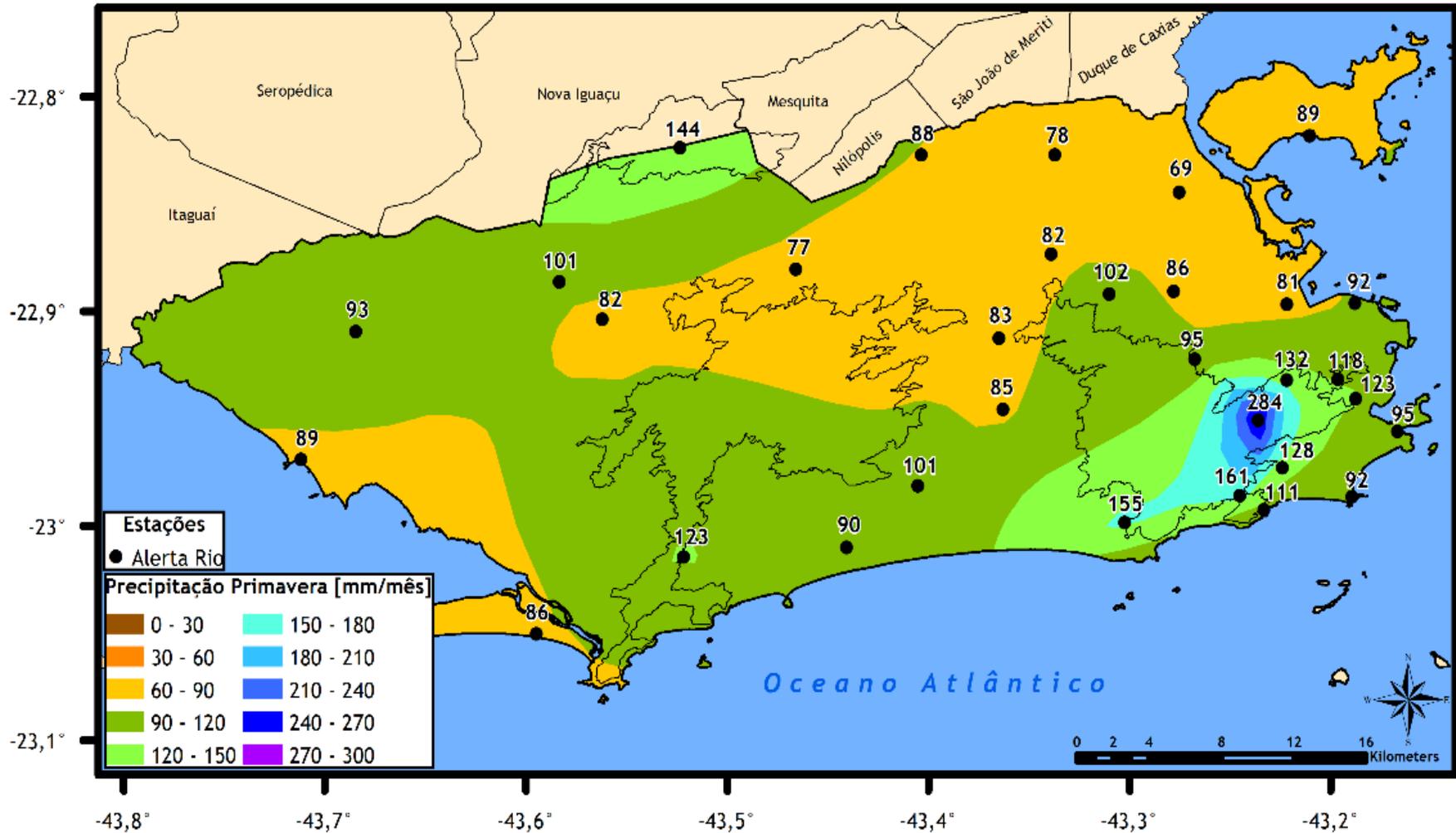
4.2 – Continuação ...

(c) Inverno



4.2 – Continuação ...

(d) Primavera



4.2 – Final.

O total anual médio de dias úmidos, ou seja, dias nos quais o total pluviométrico diário é superior a 1 mm, é apresentado na Figura 4.3. Verifica-se, em média, a ocorrência de 95 dias úmidos durante o ano, oscilando entre 86 dias na Penha e 124 dias no Sumaré. Conforme apresentado no Apêndice II, o mês com maior (menor) média de dias úmidos é janeiro (agosto) registrando um total de 11 dias (5 dias).

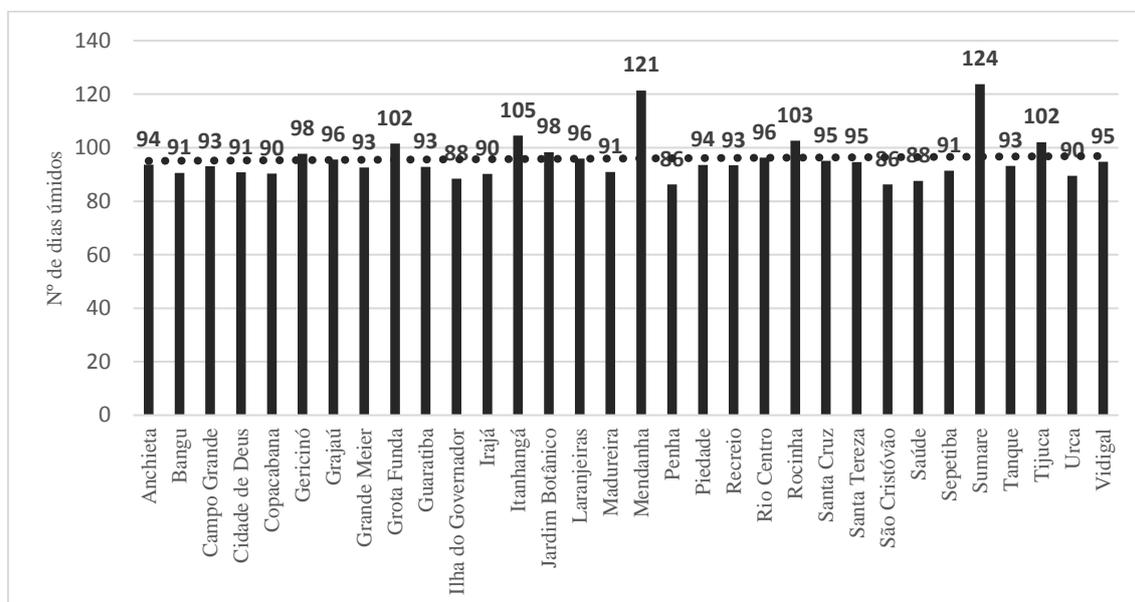


Figura 4.3 – Média anual de dias úmidos para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio (barra). A Linha tracejada representa a média no MRJ.

A Figura 4.4 apresenta o número médio sazonal de dias úmidos para cada posto pluviométrico. Em média ocorrem no MRJ cerca de 29 dias úmidos no verão, 27 na primavera, 24 no outono e 16 no inverno. Na maior parte dos postos pluviométricos, o número de dias úmidos no verão é superior ao da primavera, exceto em Guaratiba, Rocinha, Itanhangá, Jardim Botânico, Recreio, Santa Tereza, Sumaré e Tijuca, onde o número de dias úmidos na primavera é levemente superior ao do verão. Nota-se uma grande variabilidade na frequência de ocorrência de dias úmidos entre os postos pluviométricos. Por exemplo, enquanto no verão ocorrem em Copacabana apenas 25 dias úmidos, no Mendanha esse número sobe para 39, ou seja, uma frequência 56% maior.

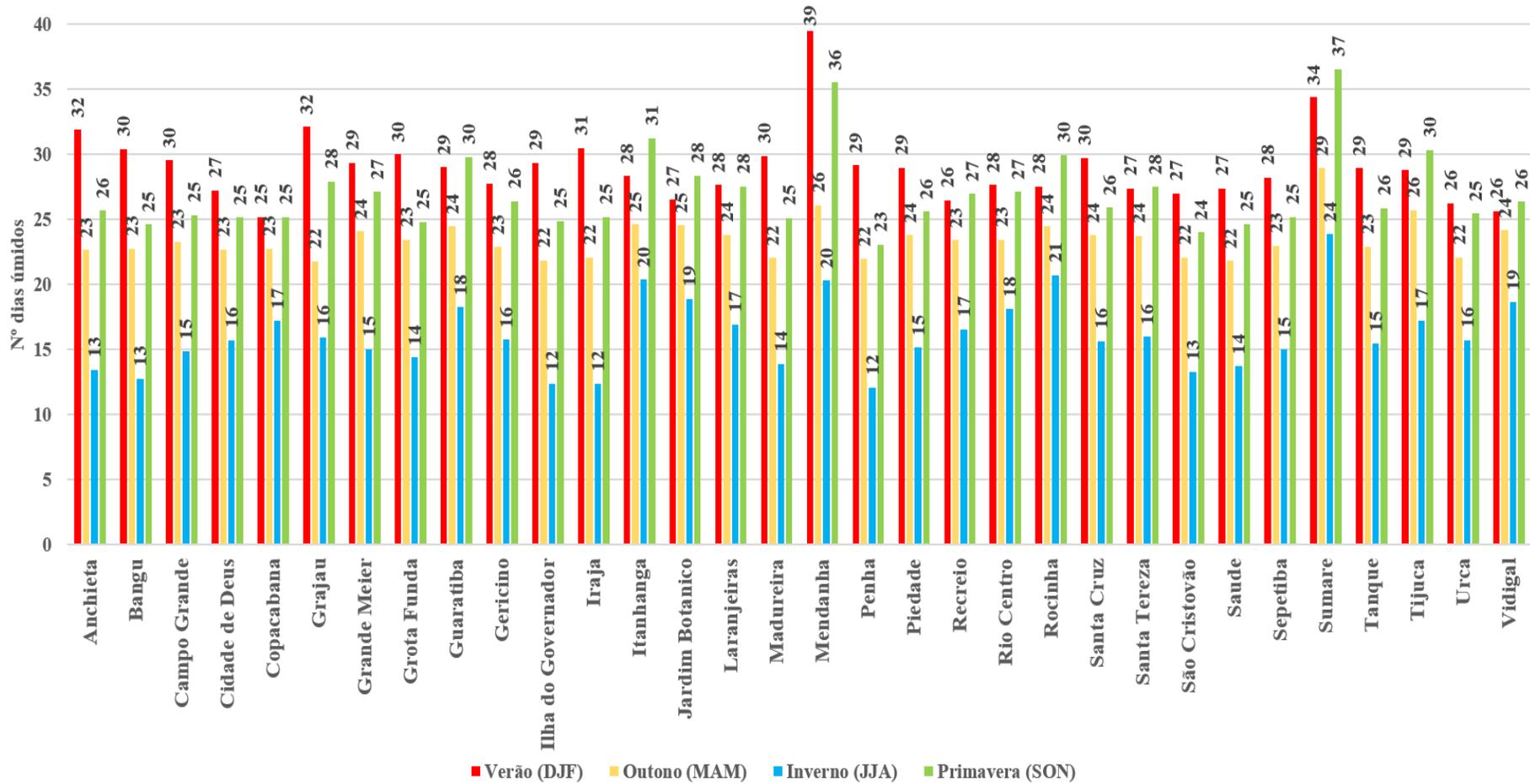


Figura 4.4 – Distribuição sazonal dos dias úmidos (acumulado diário acima de 1 mm/dia) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio: Verão (vermelho); Outono (amarelo); Inverno (azul) e Primavera (verde).

A Figura 4.5 apresenta os ciclos anuais da precipitação e dos dias úmidos para cinco postos pluviométricos selecionados em distintos ambientes do MRJ: um em ambiente lacustre (Sepetiba), um localizado junto a um maciço (Tijuca), um sob influência da Baía de Guanabara (Ilha do Governador), um na Zona Norte da cidade (Penha) e o último na Zona Sul da cidade (Jardim Botânico). Observa-se que a estação chuvosa está concentrada de maneira geral entre os meses de outubro e março, quando são acumulados cerca de 60% da precipitação anual e com ocorrência média de 10 dias úmidos por mês. A redução da chuva e dos dias úmidos que ocorre em fevereiro é devido à menor quantidade de dias nesse mês (28 dias), em relação a janeiro e março (31 dias). Observa-se os máximos (mínimos) de precipitação e dias úmidos em janeiro (agosto). Destaca-se na figura a grande variabilidade espacial da precipitação. Nota-se na Tijuca (340 metros) e Jardim Botânico (nível do mar), ambos localizados junto ao Maciço da Tijuca, elevados valores de chuva e de dias úmidos (cerca de 102 e 98 dias respectivamente). Por outro lado, na Penha (111 metros) localizada à norte e afastado do mesmo maciço, o total climatológico anual é cerca de 40% menor do que na Tijuca e os dias úmidos aproximadamente 50% menores no inverno. Por outro lado, Ilha do Governador e Sepetiba apresentam um regime pluviométrico semelhante.

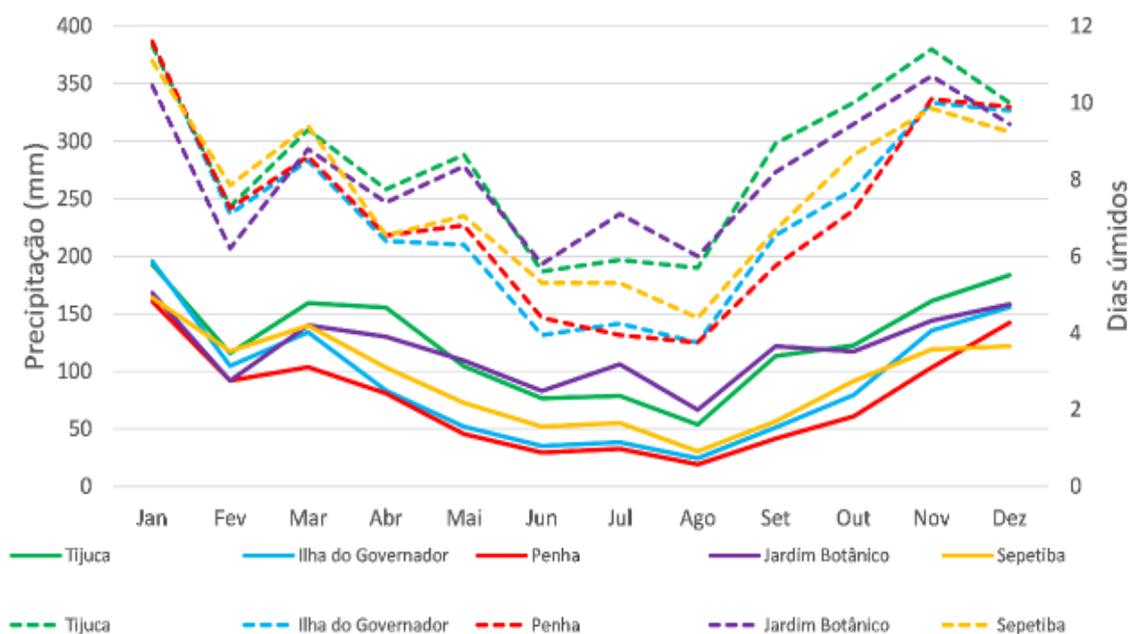


Figura 4.5 – Ciclos anuais da precipitação (escala da esquerda em mm/mês – linha cheia) e dos dias úmidos (escala da direita dias/mês – linha tracejada) para cinco postos pluviométricos selecionados no MRJ. Climatologia do período (1997-2016).

Como ressaltado anteriormente, considerando-se os 26 postos pluviométricos do Grupo I, ocorrem anualmente em média 95 dias úmidos. Portanto, se o total pluviométrico anual de 1192 mm (média nos 20 anos e considerando os 26 postos) fosse homogeneamente distribuído ao longo do ano, ocorreria em média 13 mm de chuva por dia. Contudo, logicamente isso não é observado. De acordo com Gershunov e Barnett (1998), a distribuição diária da precipitação para a maior parte do mundo é tal que poucos eventos de precipitação intensa correspondem a uma grande parte da precipitação mensal, sazonal ou anual. Groisman *et al.* (2012) afirmam que em média sobre a região central dos Estados Unidos, mais do que 70% da precipitação anual cai durante 25% dos dias cujo total diário é superior a 12,7 mm.

A Figura 4.6 apresenta para cada um dos 26 postos do Grupo I, o número médio de dias no ano e o percentual médio da precipitação anual que ocorre nos dias em que o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95. Percebe-se pela análise da figura que em média para o MRJ cerca de 33% da precipitação anual cai aproximadamente em apenas 6,6 dias quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95 de cada posto pluviométrico.

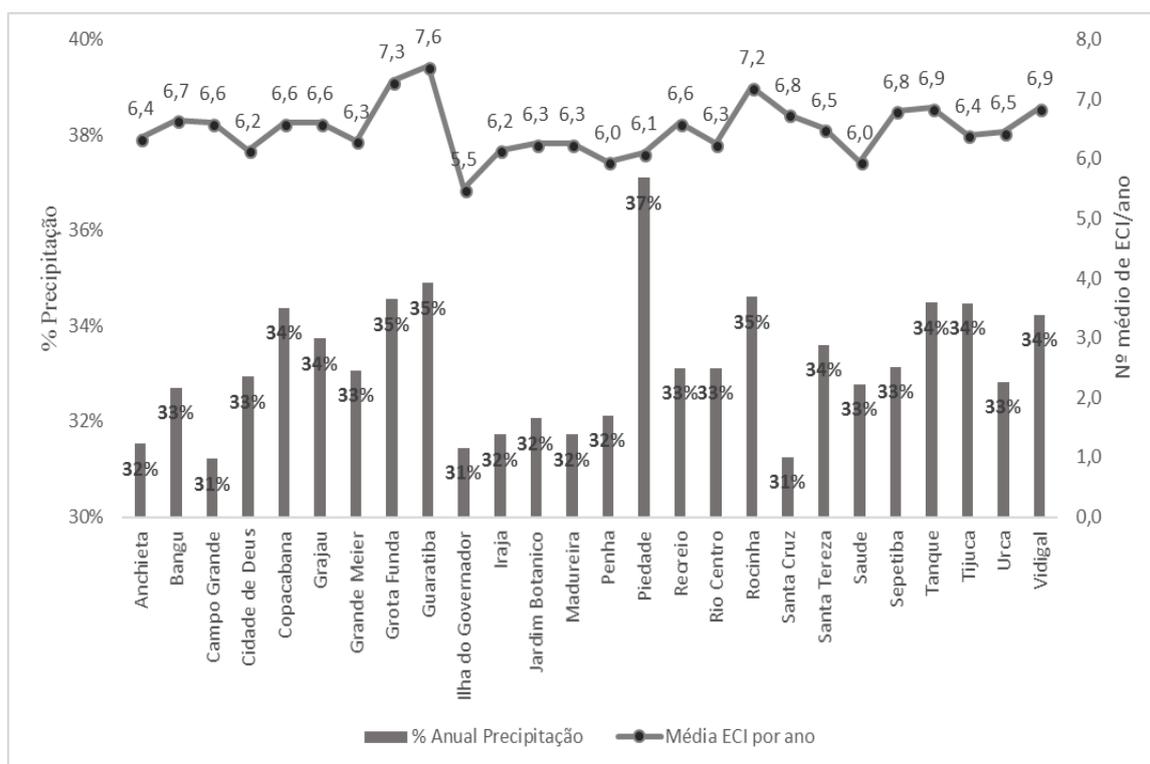


Figura 4.6 – Número médio de dias no ano (linha) e o percentual médio da precipitação anual (barra) quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95.

A partir das classes de precipitação definidas no Capítulo 3, é apresentado na Tabela 4.1 os limiares da precipitação: fraca, moderada, moderadamente intensa, intensa e muito intensa para a chuva diária (chv24h – mm/dia) e para o total pluviométrico acumulado em 15 minutos (chv15min – mm/15min) para os 32 postos pluviométricos listados na Tabela 3.1.

Tabela 4.1 – Valores dos limiares de precipitação fraca (inferior ao percentil 75), moderada (maior ou igual ao percentil 75 e inferior ao percentil 90), moderadamente intensa (maior ou igual ao percentil 90 e inferior ao percentil 95), intensa (maior ou igual ao percentil 95 e inferior ao percentil 99) e muito intensa (maior ou igual ao percentil 99), para os 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho. Os postos estão divididos nos Grupos I (em negrito), II (sublinhados) e III (em itálico) e, para cada um deles, apresentam-se na primeira (segunda) linha os limiares relativos a chv15min (chv24h). Os Percentis 95 de chv15min e chv24h estão em negrito.

Postos Pluviométricos		Limiares de Precipitação (mm)				
		Fraca	Moderada	Moderadamente intensa	Intensa	Muito intensa
Anchieta	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 9,2	≥ 9,2
	chv24h	< 10,6	10,6 - 24,6	24,6 - 34,6	34,6 - 67,5	≥ 67,5
Bangu	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,0	≥ 8,0
	chv24h	< 10,2	10,2 - 22,2	22,2 - 32,1	32,1 - 55,6	≥ 55,6
Campo Grande	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 10,6	10,6 - 21,8	21,8 - 31,8	31,8 - 53,9	≥ 53,9
Cidade de Deus	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 10,4	10,4 - 23,5	23,5 - 35,4	35,4 - 63,8	≥ 63,8
Copacabana	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 8,0	≥ 8,0
	chv24h	< 11,2	11,2 - 23,8	23,8 - 37,4	37,4 - 68,5	≥ 68,5
Grajaú	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,4	≥ 8,4
	chv24h	< 11,2	11,2 - 25,4	25,4 - 37,4	37,4 - 72,0	≥ 72,0
Grande Meier	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,6	≥ 8,6
	chv24h	< 10,6	10,6 - 22,8	22,8 - 34,0	34,0 - 68,4	≥ 68,4
Grota Funda	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 2,8	2,8 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 12,6	12,6 - 27,7	27,7 - 41,6	42,6 - 82,2	≥ 82,2
Guaratiba	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,6	2,6 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 9,8	9,8 - 21,2	21,2 - 30,6	30,6 - 58,6	≥ 58,6
<i>Gericinó</i>	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,7	2,7 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 10,8	10,8 - 22,2	22,2 - 33,6	33,6 - 61,9	≥ 61,9
Ilha do Governador	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,2	3,2 - 9,0	≥ 9,0
	chv24h	< 10,6	10,6 - 21,9	21,9 - 36,0	36,0 - 69,1	≥ 69,1
Irajá	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 3,0	3,0 - 8,2	≥ 8,2
	chv24h	< 9,8	9,8 - 21,2	21,1 - 32,0	32,0 - 63,2	≥ 63,2
<i>Itanhanga</i>	chv15min	< 1,0	1,0 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 14,0	14,0 - 33,7	33,7 - 48,0	48,0 - 91,2	≥ 91,2

Tabela 4.1 – Final.

Postos Pluviométricos		Limiares de Precipitação (mm)				
		Fraca	Moderada	Moderadamente intensa	Intensa	Muito intensa
Jardim Botânico	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 13,2	13,2 - 29,3	29,3 - 47,3	47,3 - 80,7	≥ 80,7
Laranjeiras	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 2,8	2,8 - 7,4	≥ 7,4
	chv24h	< 12,6	12,6 - 28,6	28,6 - 43,0	43,0 - 77,1	≥ 77,1
Madureira	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,4	≥ 8,4
	chv24h	< 10,4	10,4 - 23,1	23,1 - 33,6	33,6 - 57,1	≥ 57,1
Mendanha	chv15min	< 0,6	0,6 - 1,4	1,4 - 2,4	2,4 - 6,7	≥ 6,7
	chv24h	< 13,0	13,0 - 27,4	27,4 - 37,6	37,6 - 64,4	≥ 64,4
Penha	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,9	≥ 7,9
	chv24h	< 9,2	9,2 - 19,0	19,0 - 30,4	30,4 - 57,2	≥ 57,2
Piedade	chv15min	< 0,8	0,8 - 2,0	2,0 - 3,6	3,6 - 9,8	≥ 9,8
	chv24h	< 12,6	12,6 - 28,2	28,2 - 45,5	45,5 - 95,5	≥ 95,5
Recreio	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 10,4	10,4 - 23,3	23,3 - 33,6	33,6 - 62,6	≥ 62,6
Rio Centro	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 2,8	2,8 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 11,2	11,2 - 26,0	26,0 - 39,6	39,6 - 70,1	≥ 70,1
Rocinha	chv15min	< 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,2	3,2 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 14,3	14,3 - 34,4	34,4 - 53,4	53,4 - 93,2	≥ 93,2
Santa Cruz	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 2,8	2,8 - 8,4	≥ 8,4
	chv24h	< 11,2	11,2 - 23,8	23,8 - 34,7	34,7 - 63,6	≥ 63,3
Santa Tereza	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,7	2,7 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 11,3	11,3 - 26,8	26,8 - 41,6	41,6 - 75,3	≥ 75,3
São Cristóvão	chv15min	< 0,6	0,6 - 1,6	1,6 - 2,7	2,7 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 9,8	9,8 - 21,4	21,4 - 31,9	31,9 - 60,3	≥ 60,3
Saúde	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 3,0	3,0 - 8,3	≥ 8,3
	chv24h	< 10,4	10,4 - 24,6	24,6 - 36,2	36,2 - 65,1	≥ 65,1
Sepetiba	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 10,6	10,6 - 23,4	23,4 - 34,2	34,2 - 61,6	≥ 61,6
Sumaré	chv15min	< 1,0	1,0 - 2,2	2,2 - 3,4	3,4 - 7,1	≥ 7,1
	chv24h	< 17,4	17,4 - 43,8	43,8 - 66,6	66,6 - 138,6	≥ 138,6
Tanque	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 9,8	9,8 - 22,9	22,9 - 33,6	33,6 - 58,2	≥ 58,2
Tijuca	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 7,9	≥ 7,9
	chv24h	< 12,6	12,6 - 31,4	31,4 - 46,3	46,3 - 92,0	≥ 92,0
Urca	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 2,8	2,8 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 11,2	11,2 - 24,0	24,0 - 36,4	36,4 - 66,1	≥ 66,1
Vidigal	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 8,2	≥ 8,2
	chv24h	< 11,8	11,8 - 27,0	27,0 - 41,4	41,4 - 74,5	≥ 74,5

Nota-se, por exemplo, que na estação da Penha considera-se como chuva fraca quando o total pluviométrico diário é inferior a 9,2 mm/dia, moderada quando está entre 9,2 e 19,0 mm/dia, moderadamente intensa entre 19,0 e 30,4 mm/dia, intensa entre 30,4 e 57,2 mm/dia e, finalmente, muito intensa quando o total pluviométrico diário é maior ou igual a 57,2 mm/dia. Na Estação do Sumaré uma chuva considerada moderadamente intensa (entre 43,8 e 66,6 mm/dia) pode ser considerada muito intensa na estação da Penha (se for maior ou igual a 57,2 mm/dia).

Em relação a registros de chuva em 15 minutos, na Penha a precipitação é classificada como chuva fraca quando os registros são inferiores a 0,8 mm/15min, moderada entre 0,8 e 1,6 mm/15min, moderadamente intensa entre 1,6 e 2,8 mm/15min, intensa entre 2,8 e 7,9 mm/15min e muito intensa valores acima de 7,9 mm/15min. Portanto uma chuva de 15 minutos no valor de 2,8 mm/15min é considerada intensa na estação Penha, porém, na estação Piedade essa chuva é considerada moderadamente intensa (valores variando entre 2,0 e 3,6 mm/15min).

Os totais pluviométricos máximos acumulados em 15 e 30 minutos, 1 hora e 1 dia foram determinados para cada posto pluviométrico (Tabela 4.2). Os máximos absolutos em 15 e 30 minutos, 1 hora e 24 horas foram calculados, selecionando o maior valor registrado dentre os 20 anos para cada posto pluviométrico. No caso dos máximos de 30 minutos, 1 hora e 24 horas, foram calculados os totais móveis.

Tabela 4.2 – Maiores totais pluviométricos (mm) acumulados em 15 minutos, 30 minutos, 1 hora e 24 horas registrados nos 32 postos pluviométricos entre 1997 e 2016.

Nome da Estação	Máximos			
	15minutos	30minutos	1hora	24horas
Anchieta	31,1	55,6	72,6	196,4
Bangu	37,2	53,8	69	146,6
Riocentro	35	55,6	92,6	218,6
Campo Grande	27,2	41,6	58,8	156,4
Copacabana	36	49,6	93,6	236
Gericinó	31,5	49,6	70,4	148,6
Grajau	34,2	55	90,3	227
Grande Meier	46	59,6	76	257,8
Grota Funda	38,6	51,8	69,2	264,2
Guaratiba	35,9	56,8	93,8	195,2
Ilha do Governador	54	67,5	93,4	202,6
Irajá	31	53,4	69,4	190,4

Tabela 4.2 – Final.

Nome da Estação	Máximos			
	15minutos	30minutos	1hora	24horas
Itanhangá	32	46	70,6	214,5
Cidade de Deus	38,1	51,6	74,8	171,2
Tanque	42,6	61,4	78,4	176,7
Jardim Botânico	37,2	49,8	81,8	303
Laranjeiras	34	50,2	80	227
Madureira	36,3	56,6	79,2	198
Mendanha	31	45	61	243,2
Penha	30,8	42,1	59,6	226,2
Piedade	32,4	46,8	70,6	185
Recreio dos Bandeirantes	35,4	61,8	76,2	190,8
Rocinha	33,8	58,4	105,2	304,6
Santa Cruz	35,8	58,4	79,4	179,4
Santa Teresa	31,6	51,1	76,8	248
São Cristóvão	36,4	56,8	72,2	213,6
Saúde	31,2	53,2	82	189,4
Sepetiba	31,8	45,4	71,8	220,8
Sumaré	44	65	103,4	360,2
Tijuca	35,2	56,6	86,4	281,9
Urca	27,2	44,8	68,4	177,6
Vidigal	39	58	106,4	264,6

Observa-se que a precipitação máxima totalizada em 15 minutos, mantém-se em média em torno de 35,4 mm, com um desvio padrão de 5,5 mm. Em 30 minutos, a precipitação máxima média sobe para 53,4 mm, com um desvio padrão também de 6,4 mm. Os máximos em 1 hora apresentam média em torno de 79,2 mm e desvio padrão de 12,6 mm. Os máximos médios em 24 horas ficam em torno de 216,6 mm, com um desvio padrão de 49,2 mm.

Uma investigação nas datas de ocorrência dos máximos em 24 horas, listados na Tabela 4.1, é realizada. Verifica-se que durante um mesmo evento, podem ocorrer vários máximos. Por exemplo, no dia 06 de abril de 2010, 14 estações registraram seu máximo valor de precipitação em 24 horas: Sumaré (360,2 mm), Rocinha (304,6 mm), Jardim Botânico (303,0 mm), Vidigal (264,6 mm), Grande Meier (257,8 mm), Santa Tereza (248,0 mm), Grajaú e Laranjeiras (227,0 mm), Penha (226,2 mm), São Cristóvão (213,6 mm), Ilha do Governador (202,6 mm), Recreio dos Bandeirantes (190,8 mm), Saúde (189,4 mm) e Urca (177,6 mm).

4.2 Climatologia de ECIs no MRJ

O critério objetivo estabelecido para selecionar os ECIs é testado para o ano de 2016, considerando-se as 26 estações do conjunto de dados do Grupo I. Uma avaliação desse critério é apresentada na Seção 4.2.1. A seguir, na Seção 4.2.2, é apresentada uma climatologia desses eventos, aplicando o critério objetivo proposto para todo o período de dados (1997-2016).

4.2.1 Avaliação do Critério utilizado para Identificação de Eventos de Chuva

Intensa

Para ser considerado um ECI é necessário que tanto o acumulado de chuva diária (chv24h) quanto o acumulado em 15 minutos (chv15min) sejam superiores a seus percentis 95 e que ocorram concomitantemente. Na Figura 4.7 são apresentados os valores dos percentis 95 para chv24h (barra) e chv15min (linha).

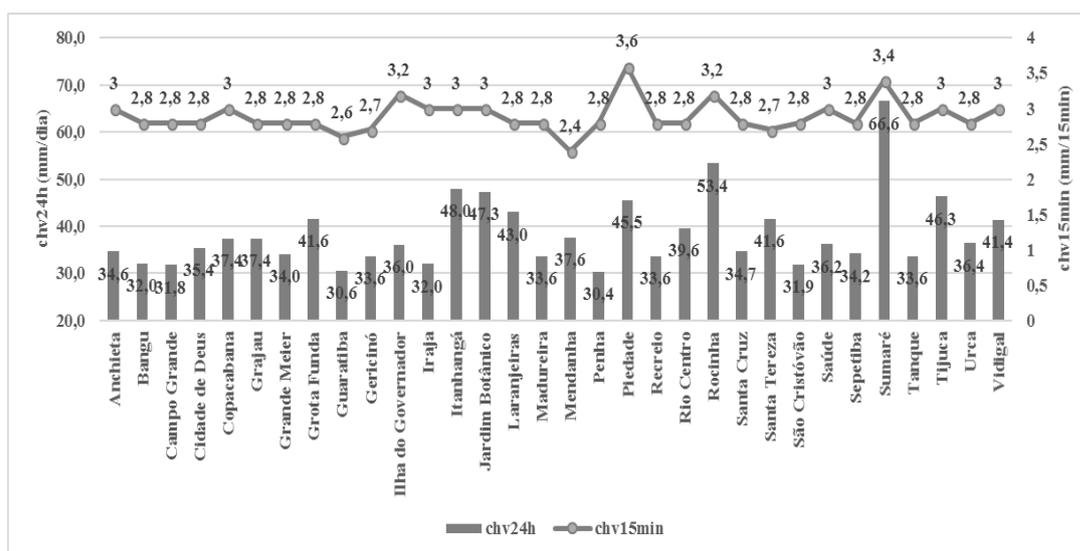


Figura 4.7 – Percentis 95 para precipitação acumulada em 24 horas (chv24min – mm/dia em barra) e percentil 95 de precipitação acumulada em 15 minutos (chv15min – mm/15min em linha).

Nota-se na figura que o menor valor do percentil 95 do chv24h é de 30,4 mm/dia (Penha) e o menor percentil 95 de chv15min é 2,4 mm/15min (Mendanha). Dessa forma, em um ECI o total pluviométrico diário em qualquer posto pluviométrico é necessariamente superior a 30,4 mm e o total pluviométrico acumulado em 15 minutos é superior a 2,4 mm. Tais limiares representam o limite inferior de um ECI para o MRJ. Analisando-se as séries de todos os postos pluviométricos utilizados nesta etapa do trabalho, pode-se notar que na maioria das vezes em que a chuva acumulada em 24 h é intensa, o total pluviométrico em 15 minutos também é intenso. Apenas em 5% dos casos, o critério é atendido para chv24h, mas não para chv15min.

Após aplicação do critério objetivo aos dados de precipitação dos 26 postos do Sistema Alerta Rio com 20 anos de dados, além São Cristóvão e Laranjeiras (com 16 anos de dados) e que estavam operantes durante os 366 dias do ano de 2016, os seguintes resultados foram encontrados:

- i) Trinta e cinco datas foram identificadas pelo método objetivo proposto (Tabela 4.3) como ECIs, sendo que em 4 desses dias não houve ocorrência de transtornos na cidade. Dessa forma, considerando a Tabela de contingência (Tabela 3.2) apresentada no Capítulo 3: $A=31$ e $B=4$. Nesses 4 dias o critério foi atendido em apenas 1 ou 2 postos pluviométricos.
- ii) Em 4 dias ocorreram transtornos relacionados com chuvas na cidade, devidamente documentado nas planilhas do COR e/ou através de notícias nos principais veículos de comunicação, porém em nenhum posto pluviométrico o critério objetivo foi atingido. Assim, $C=4$. Nesses 4 dias, a chv_{24h} ficou próximo ao percentil 95 em alguns postos pluviométricos, sem ultrapassá-los.
- iii) Nos demais dias do ano ($366-31-4-4=327$ dias) não houve registro de transtornos na cidade e o critério objetivo também não foi atingido. Dessa forma, $D=327$.

Tabela 4.3 – Casos identificados como eventos de chuva intensa a partir do critério objetivo adotado.

Nº de Eventos	Dia/Mês de 2016	Número de postos que atingiram o critério	Maior chv_{15min} (mm)	Maior chv_{24h} (mm)	Ocorrência de transtornos na cidade
1	01/01	3	30,0	70,6	Sim
2	13/01	5	16,8	70,6	Sim
3	14/01	5	15,6	56,0	Sim
4	15/01	16	17,8	84,4	Sim
5	16/01	23	9,2	107,0	Sim
6	19/01	5	11,4	49,2	Sim
7	22/01	1	8,0	55,0	Não
8	28/01	5	24,8	61,6	Sim
9	11/02	1	8,2	42,6	Não
10	15/02	2	18,0	51,6	Sim
11	16/02	1	25,8	61,2	Sim
12	17/02	1	18,8	35,6	Sim
13	20/02	2	26,8	64,6	Sim
14	21/02	3	20,8	93,6	Sim
15	22/02	3	19,8	56,8	Sim
16	29/02	30	31,4	200,0	Sim
17	12/03	18	39,4	272,0	Sim
18	13/03	2	11,8	61,4	Sim
19	16/03	12	20,4	141,6	Sim
20	23/03	4	21,8	55,0	Sim
21	13/05	1	5,8	65,0	Sim

Tabela 4.3 – Fim.

Nº de Eventos	Dia/Mês de 2016	Número de postos que atingiram o critério	Maior chv15min (mm)	Maior chv24h (mm)	Ocorrência de transtornos na cidade
22	18/05	1	9,0	48,8	Sim
23	19/05	1	3,4	55,2	Sim
24	05/06	1	17,0	82,4	Sim
25	07/06	11	9,8	124,0	Sim
26	20/09	6	22,2	94,4	Sim
27	04/10	3	5,6	89,6	Sim
28	04/11	16	8,4	54,0	Sim
29	05/11	6	8,2	59,4	Sim
30	08/11	2	30,0	41,8	Não
31	13/11	9	14,4	86,2	Sim
32	14/11	2	7,4	45,4	Não
33	12/12	12	16,6	102,2	Sim
34	14/12	2	11,2	38,6	Sim
35	30/12	5	19,2	54,0	Sim

Assim, com A=31, B=4, C=4 e D=327, obtêm-se a partir das equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 respectivamente (Tabela 4.4): AC = 97,8%, AF = 11,4%, VIES = 1, TS = 79,5% e POD = 88,6%. Tais resultados, para o ano de 2016, indicam um índice de acerto (AC) e índice crítico de sucesso (TS) elevado, baixo alarme falso (AF), alta probabilidade de detecção do evento (POD) e viés igual a unidade, demonstrando que o número de eventos projetados pelo método proposto é igual ao número de eventos observados.

Tabela 4.4 - Tabela de contingência para os dias de ocorrência de ECI em 2016 no MRJ.

		Observado		
		Sim	Não	TOTAL
Identificado a partir do critério proposto	Sim	31	4	35
	Não	4	327	331
	TOTAL	35	331	366
AC	AF	TS	POD	VIES
97,8%	11,4%	79,5%	88,6%	1

Conclui-se, portanto, que o critério proposto está sendo capaz de identificar a maior parte dos ECIs ocorridos na cidade, com elevada taxa de acerto e baixo índice de alarme falso. Os resultados mostram uma ótima performance da metodologia proposta, apresentando elevado índice de acerto (97,8%) e baixo índice de alarme falso (11,4%). É importante realçar que o limite inferior para ocorrência de ECIs é chv24h de 30,4 mm/dia e chv15min de 2,4 mm/15min. Ademais, na maior parte (95%) dos ECIs os limiares de

chv24h e de chv15min são atendidos conjuntamente, sendo que apenas em 5% dos casos em que ocorre ultrapassagem de chv24h, o mesmo não ocorre para chv15min. Por outro lado, é importante ressaltar que os eventos de chuva moderada, mesmo que ocorrendo durante vários dias consecutivos, provavelmente causará transtornos na cidade, não sendo detectados por esta metodologia.

4.2.2 Climatologia de Eventos de Chuva Intensa (1997-2016)

Um dos objetivos da investigação da climatologia dos ECIs é identificar as áreas de maior ocorrência de tais eventos. Na Figura 4.8 apresenta-se a distribuição espacial do número médio de ECIs por ano para cada um dos 32 postos pluviométricos listados na Tabela 3.1. É importante destacar que nessa figura a contagem da frequência de ECIs é feita para cada localidade, aplicando-se o critério proposto individualmente para cada posto pluviométrico. Dessa forma, o fato de maior parte das localidades ocorrerem entre 6 e 6,5 ECIs, não significa que ocorrem em média apenas esses dias de chuvas intensas por ano em toda a cidade. A diferença entre os eventos ocorridos por ano na cidade e os eventos ocorridos por estação ocorre devido ao fato dos ECIs identificados em um determinado posto pluviométrico não serem necessariamente os mesmos daqueles identificados nos demais postos. Isso resulta, portanto, em um número maior de ECIs quando se analisa conjuntamente todos os postos localizados na cidade. Regressando à análise da figura, notam-se máximos coincidentes com as regiões mais chuvosas do MRJ, localizadas próximo aos maciços da Tijuca e do Gericinó. Ou seja, além de chover mais em média próximo a essas áreas de maior altitude, observa-se também a maior frequência de ocorrência de dias de ECIs nessas regiões. Enquanto no Sumaré e no Mendanha ocorrem em média 8 dias de ECIs por ano, na Saúde e na Tijuca essa média cai para 5,7 dias.

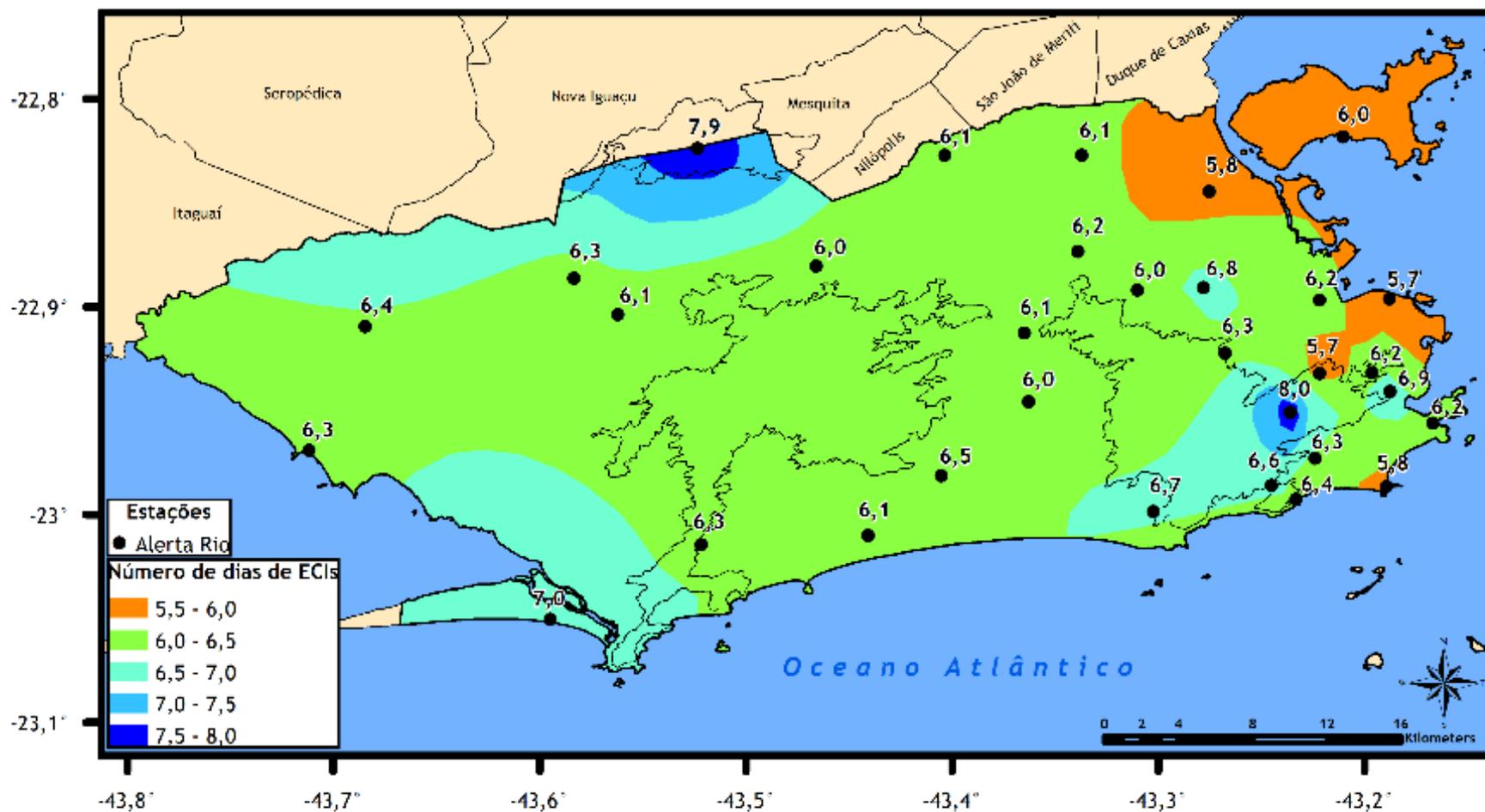


Figura 4.8 – Número médio anual de dias de ECIs identificados para cada posto pluviométrico.

A Figura 4.9 apresenta a distribuição espacial sazonal do número médio de ECIs no MRJ. Nota-se que no verão (Figura 4.9a) ocorrem os maiores valores médios de ECIs da cidade. Nessa estação, os maiores valores estão localizados na porção norte do MRJ, com um máximo de 4,0 ECIs em Irajá, representando a soma das médias mensais de ECIs entre dezembro e fevereiro. Esses máximos ocorrem na Zona Norte devido ao maior aquecimento local, que atua como um gatilho para a formação de nuvens convectivas e ocorrência de precipitação intensa, principalmente no final da tarde e início da noite. Um segundo máximo é encontrado na porção sul do MRJ, próximo à Guaratiba, provavelmente devido à entrada de SFs por esse setor da cidade. Observa-se que o outono (Figura 4.9b) é a segunda estação do ano com a maior ocorrência de ECIs. O posto pluviométrico Mendanha apresenta o maior valor climatológico de ECIs, com 2,7 dias em 3 meses. Ainda no outono, um mínimo é observado na Zona Norte, com apenas 1,1 ECI em Irajá. No inverno (Figura 4.9c), como esperado, ocorre a menor frequência de ECIs. Isso se deve ao fato de que no inverno predominam condições termodinâmicas de uma atmosfera mais estável e mais seca, inibindo a formação de nebulosidade convectiva. Na primavera (Figura 4.9d), em média, as ocorrências de ECIs são baixas em quase toda a cidade. Entretanto, verifica-se uma região de destaque no Maciço da Tijuca, com média de 2,5 ECIs registrados no posto Sumaré.

(a) Verão

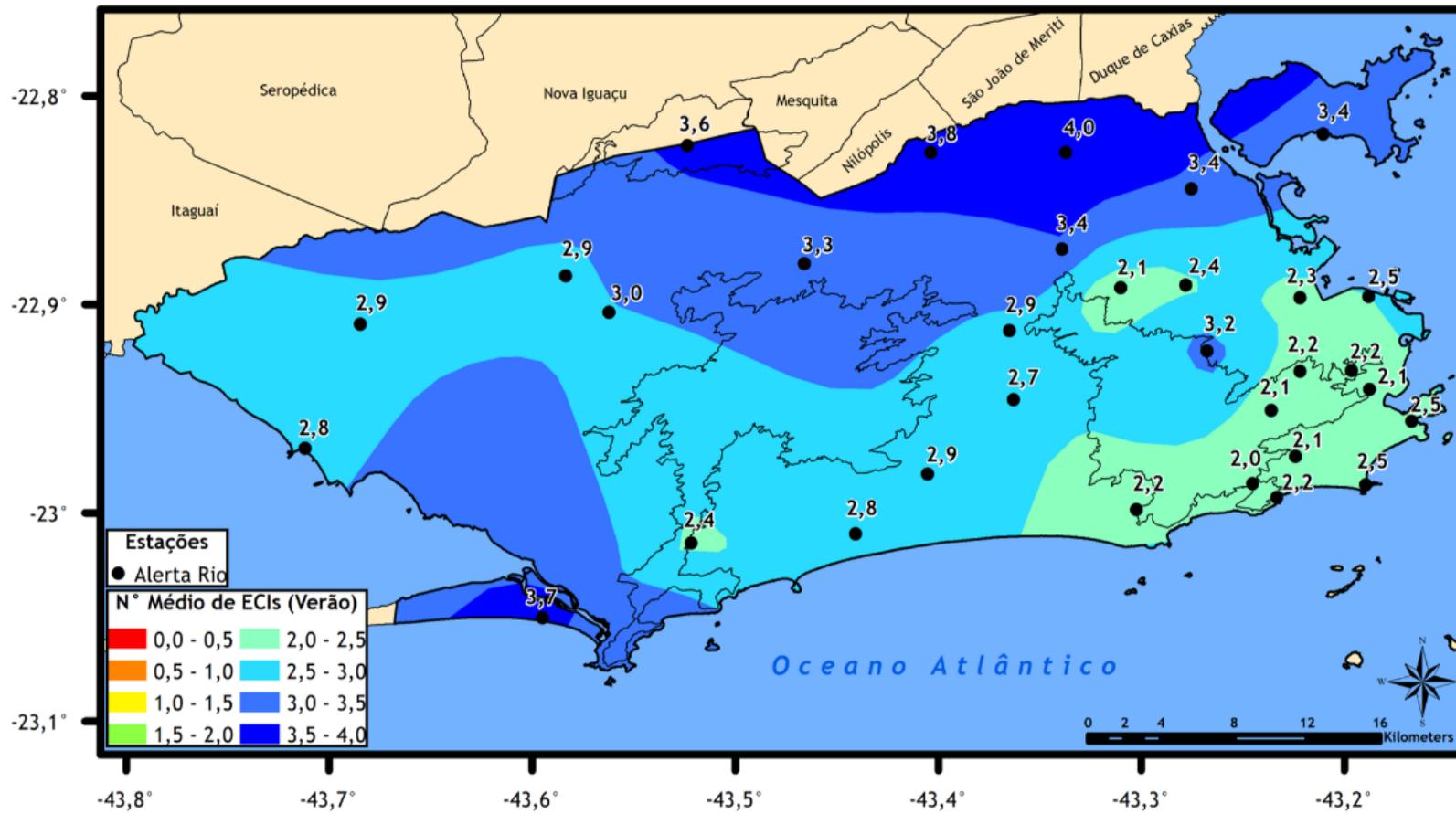


Figura 4.9 – Número médio sazonal de ECIs identificados para cada posto pluviométrico: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno e (d) Primavera

(b) Outono

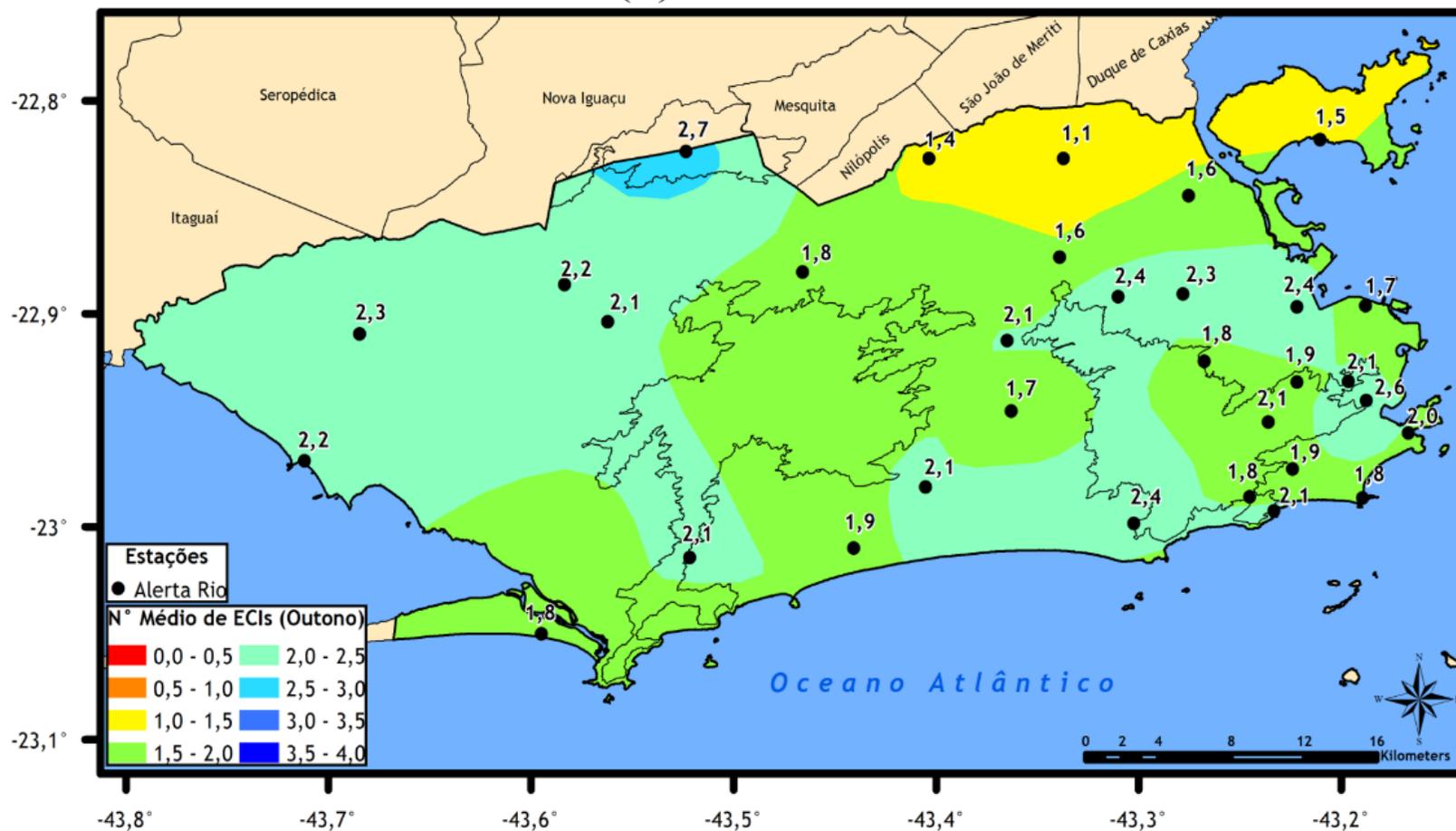


Figura 4.9 – Continuação ...

(c) Inverno

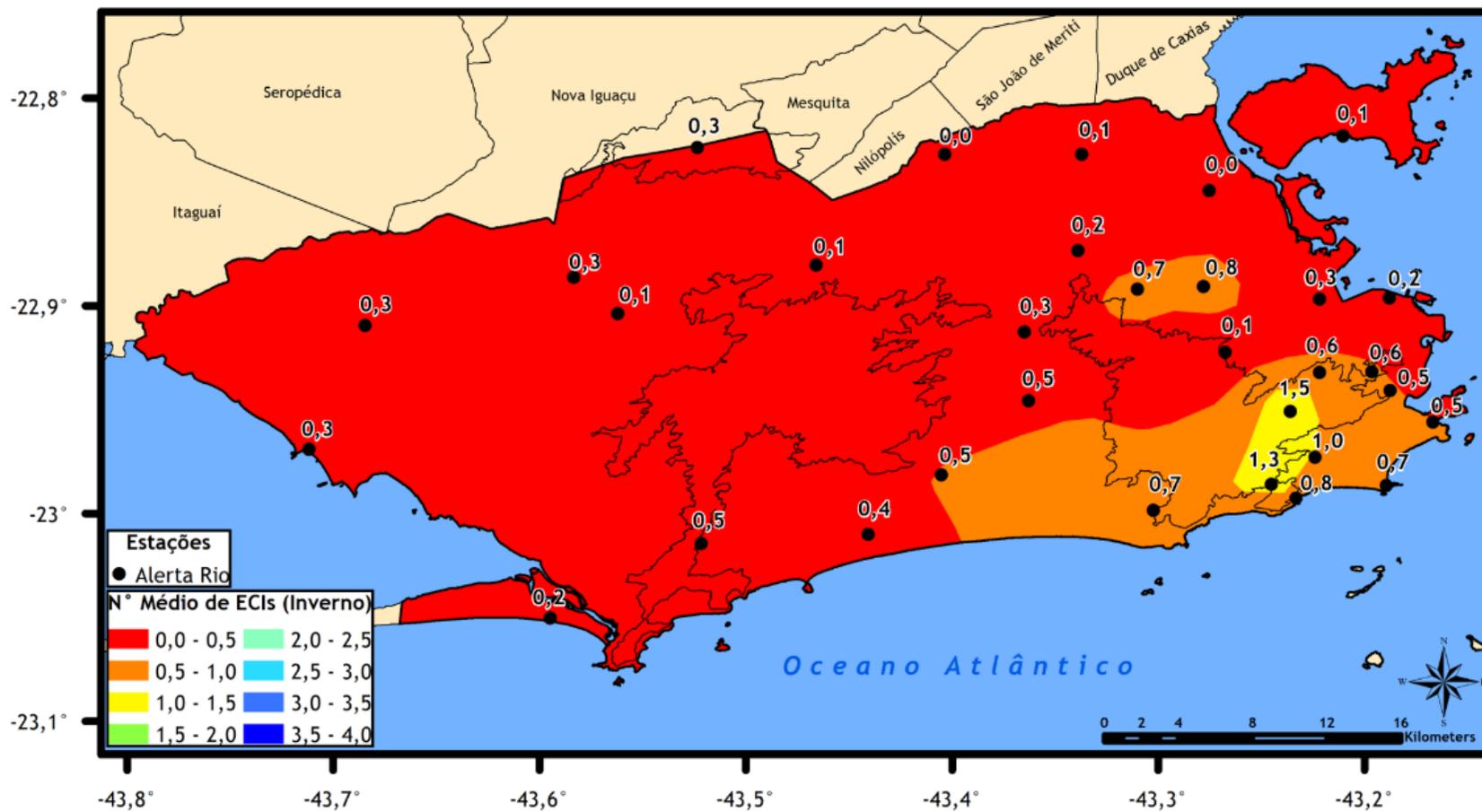


Figura 4.9 – Continuação ...

(d) Primavera

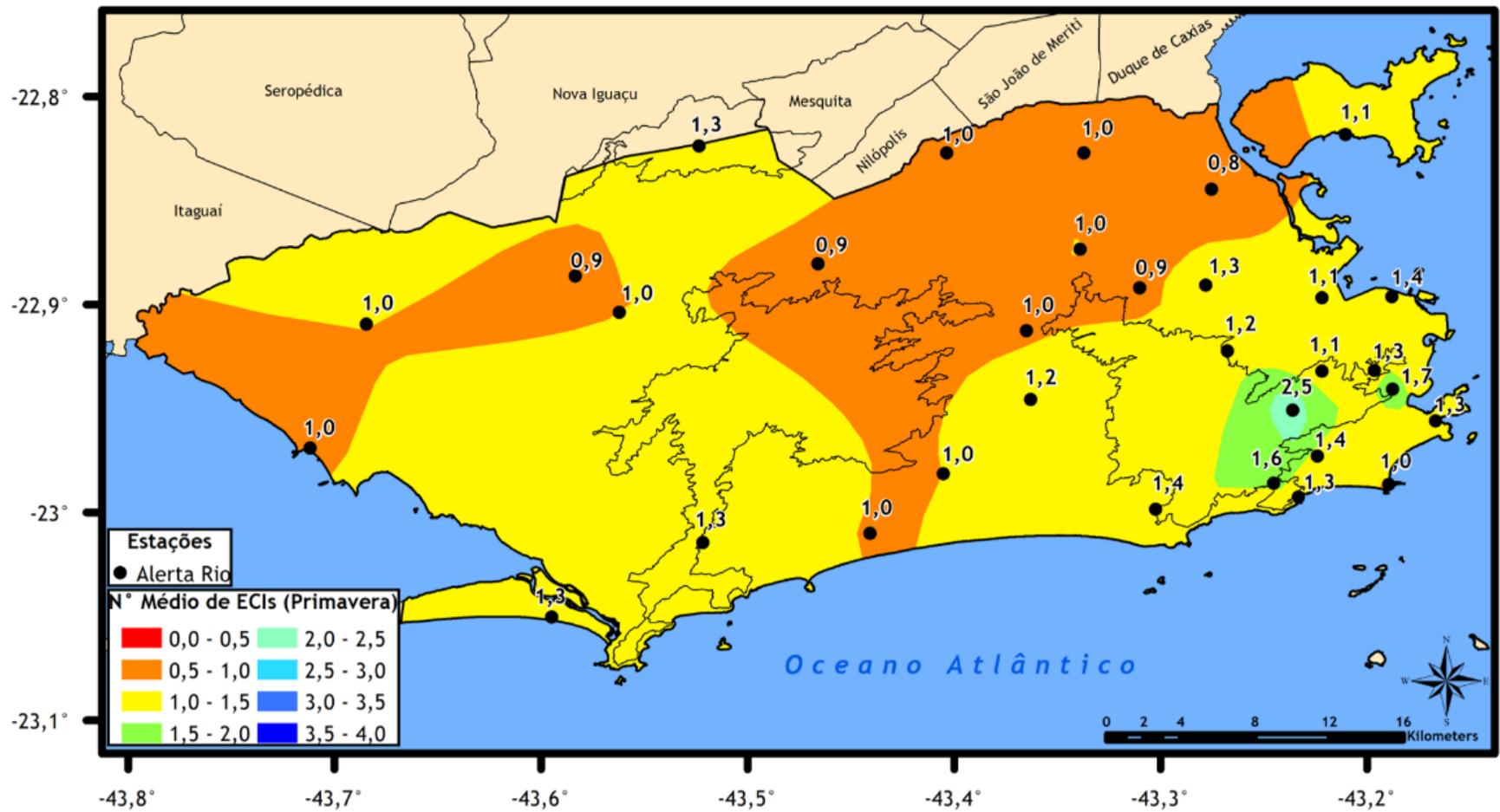


Figura 4.9 – Final.

Além de conhecer a distribuição espacial dos ECIs, é importante que o previsor de tempo saiba quantos dias em média ao longo de um ano ele deverá lidar com o problema de prever ECIs que ocorrem na cidade. Dessa forma, realiza-se a contagem da frequência de ECIs considerando o número de dias por ano em que pelo menos um dos postos pluviométricos do Alerta Rio atingiu o critério proposto. Tais resultados são apresentados na Figura 4.10. Para esta etapa foram utilizados dados dos 26 postos pluviométricos que permaneceram em operação continuamente entre 1997 e 2016 (Grupo I), excluindo o ano de 2001 por apresentar 20% de dados faltosos. Os resultados demonstram que, em média, ocorre um total de 30,1 com desvio padrão de 6,6 dias por ano com ocorrência de ECI em toda a cidade. Nota-se também uma elevada variabilidade interanual, com frequência de ECIs oscilando entre 18 dias em 2007 até 41 dias em 2009.

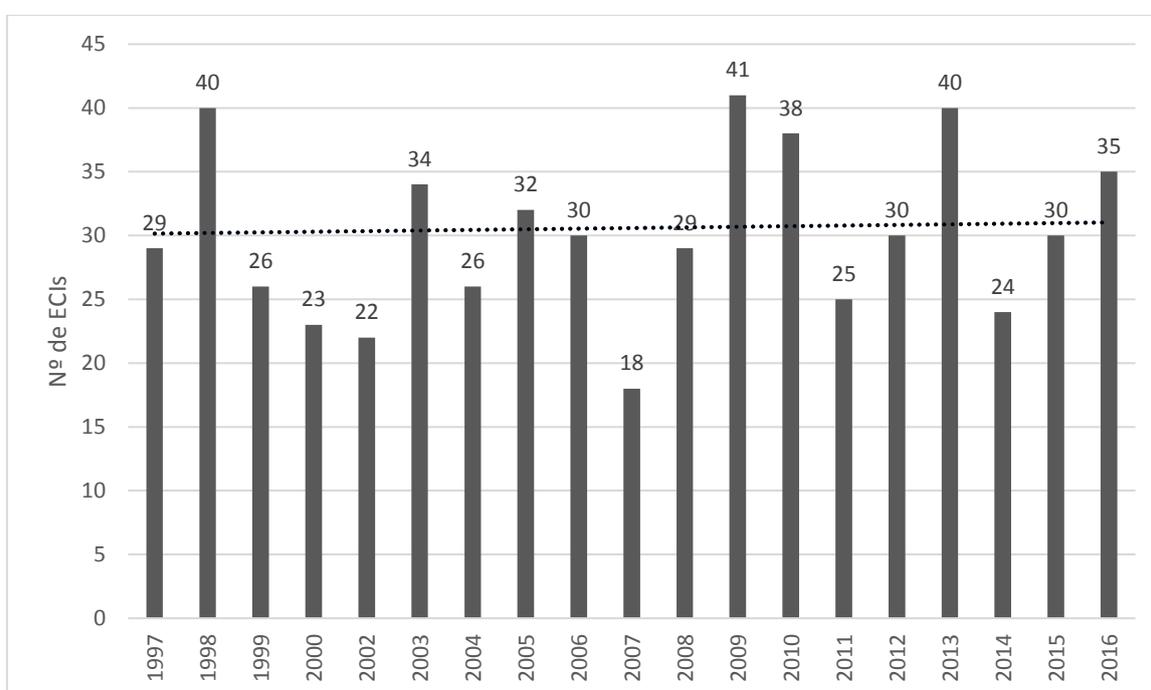


Figura 4.10 – Total anual de dias de ECIs identificados. O ano de 2001 foi excluído devido a apresentar mais de 20% de dados faltantes. Ocorrência média de ECI (linha tracejada).

Barcellos (2009) utilizou a técnica dos percentis para analisar dados de chuva do Sistema Alerta Rio, sendo selecionados os ECIs que atingiram valores superiores ao percentil 99 da chuva diária para um total de 30 estações pluviométricas estudadas, sem limite do número mínimo de estações para que o critério fosse satisfeito. Barcellos (2009) selecionou um total de 169 ECIs no período entre janeiro de 1998 e dezembro de 2005 (8 anos), ou seja, uma média de 21 ECIs/ano. Comparando-se o critério de Barcellos (2009) com o utilizado neste trabalho, percebe-se que no atual trabalho o critério proposto é menos restritivo. Utilizando-se 26 postos pluviométricos e o mesmo período de Barcellos

(2009), ou seja 1998 a 2005, obtém-se uma média de 29 eventos por ano, ou seja, quase 35% a mais de ECIs do que o obtido por Barcellos (2009).

Na Figura 4.11 é apresentado o ciclo anual de ECIs na Ilha do Governador, em Piedade e para média dos 26 postos pluviométricos do Grupo I, com objetivo de identificar os meses de menor e maior frequência de ocorrência de dias de ECIs. Esses postos pluviométricos são escolhidos por representarem os dois comportamentos encontrados durante este estudo. Em relação ao ciclo anual de ocorrência de ECI, como esperado, na maior parte dos postos pluviométricos, a maior frequência de ocorrência de ECIs ocorre no verão, seguido do outono, primavera e inverno. Os valores médios anuais para cada um dos 26 postos pluviométricos encontram-se no Apêndice III. Portanto, configura-se um ciclo anual bem definido, com máximos no verão e mínimos no inverno, como apresentado para o posto pluviométrico da Ilha do Governador, localizado na Zona Norte da cidade. Destaca-se também, uma redução na frequência de ocorrência de ECIs no mês de fevereiro, devido ao menor número de dias nesse mês, conforme já comentado na Seção 4.1. Em vários postos pluviométricos (Grotta Funda, Guaratiba, Piedade, Santa Cruz, Santa Tereza, Sepetiba e Urca) a maior frequência de ocorrência de ECIs é observada em março, como exemplificado para Piedade, também localizado na Zona Norte da cidade. Comparando-se o ciclo anual de ECIs dos dois postos pluviométricos, nota-se na Ilha do Governador uma frequência maior de dias de ECIs no verão (57,0%), seguido do outono (24,6%), primavera (17,5%) e finalmente o inverno (0,9%). Para Piedade a maior frequência de ocorrência ocorre no outono (39,5%), a seguir no verão (34,5%), primavera (15,1%) e inverno (0,9%). Destaca-se na figura o máximo de 22,7% de dias de ECI em Piedade no mês de março, responsável por tornar a média do outono superior à do verão nesse posto pluviométrico. Ao calcular a média mensal, considerando todos os 26 postos pluviométricos, os resultados mostram os percentuais mensais, ou seja: 43,7% de eventos no verão, seguido de 30,9% no outono, 18,2% na primavera e finalmente 7,2% no inverno. Nota-se que 70% de todos os ECIs ocorrem entre dezembro e abril.

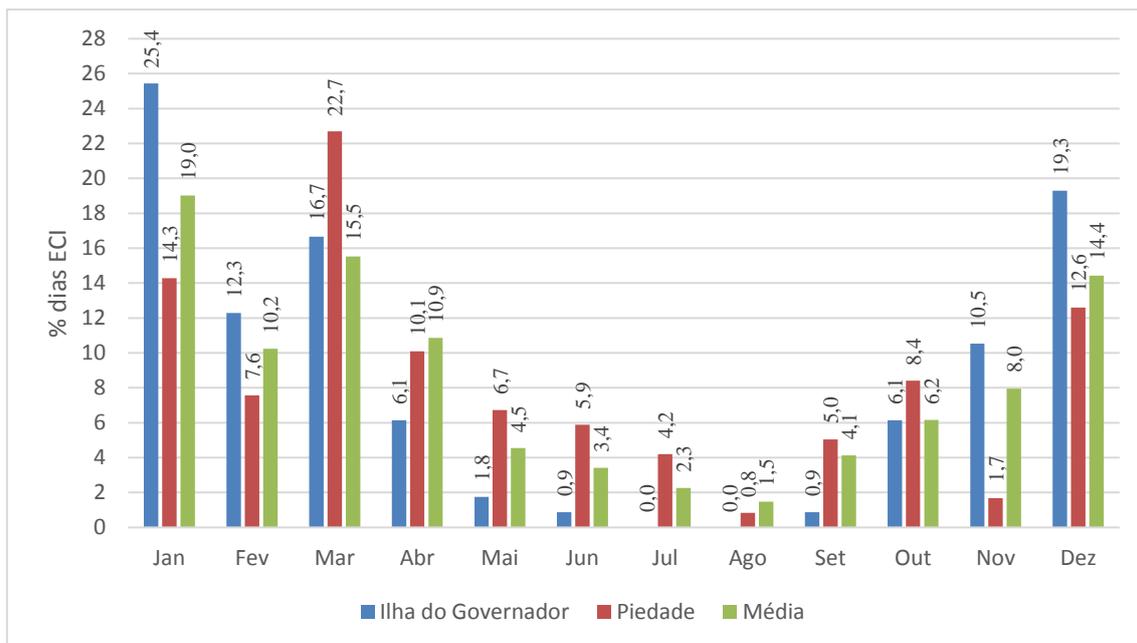


Figura 4.11 – Ciclo anual do número médio de dias de ECI na Ilha do Governador (azul), em Piedade (vermelho) e para a média dos 26 postos pluviométricos utilizados (verde) com valores destacados.

Analisando-se as séries temporais dos totais anuais de ECIs para todos os postos pluviométricos do Grupo I (Apêndice IV), verifica-se que apesar do curto período analisado (20 anos) existe uma tendência de aumento na maior parte das localidades, ou então ausência de tendência. Em apenas três postos onde ocorre tendência negativa (Guaratiba, Sepetiba e Tijuca), essa está claramente associada ao grande número de ECIs ocorridos no início da série, em 1998. Na Figura 4.12 são apresentadas as tendências para 2 postos pluviométricos do Grupo I listados na Tabela 3.1, uma com tendência positiva (Piedade) e outra com tendência negativa (Sepetiba). Na estação de Piedade (Figura 4.12a) verifica-se que nos primeiros 5 anos do período analisado ocorriam em média 3 ECIs por ano, contudo nos últimos 5 anos essa média se elevou para 13 dias. Esse resultado concorda com Dereczynski *et al.* (2013), onde os autores mostram que para as estações Santa Cruz e Alto da Boa Vista do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), está ocorrendo nas últimas décadas uma elevação no número de dias no ano com total pluviométrico diário superior a 30 mm (R30mm), sendo de +0,07 dias/ano no Alto da Boa Vista e de +0,03 dias/ano em Santa Cruz. Na estação de Sepetiba (Figura 4.12b) observa-se uma tendência de redução do número de ECIs, o que é bem nítido entre 2009 e 2016, com média de 5,1 ECIs por ano. Por outro lado, entre 1997 e 2008, há uma

tendência geral de aumento nos dias de ECIs, verificando-se, em média, a ocorrência de 7,5 ECIs por ano.

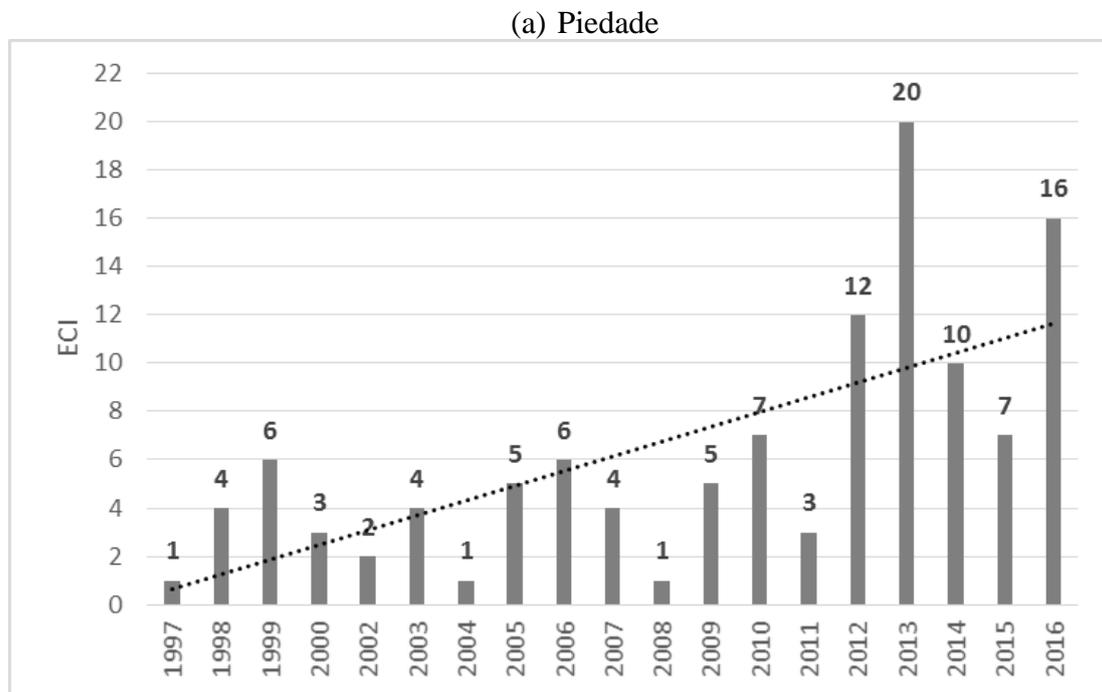


Figura 4.12 – Dias de ECIs por ano (barra) e linha de tendência: (a) Piedade e (b) Sepetiba.

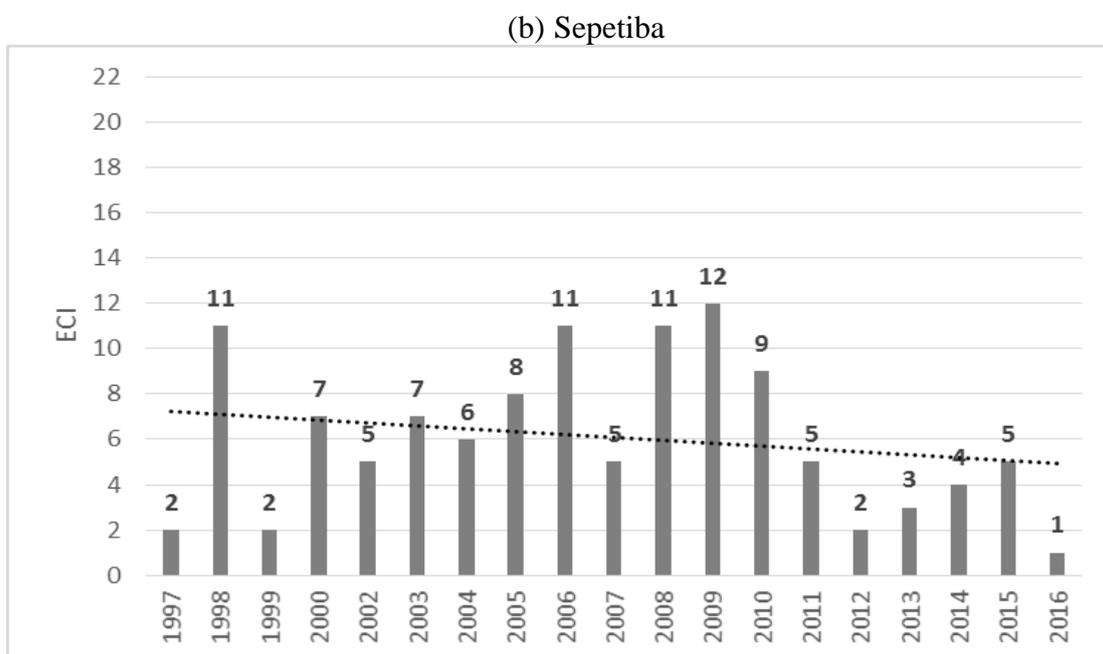


Figura 4.12 – Final.

4.3 Considerações sobre as Climatologias de Precipitação e ECI

A comparação entre a atual climatologia de 20 anos (1997-2016) e de 10 anos (1997-2006) descrita em DOM09, revela padrões espaciais bem similares. Os valores máximos da precipitação ocorrem à barlavento das regiões montanhosas, levando em conta a direção de propagação dos sistemas transientes, que é de norte para sul. Além disso, a brisa marítima desloca-se no mesmo sentido. Assim como em DOM09, são verificados três núcleos máximos principais de precipitação no MRJ. Um núcleo máximo principal de precipitação sempre localizado junto ao Maciço da Tijuca, registrado na estação do Sumaré, e dois outros máximos secundários sendo encontrados, um no Maciço da Pedra Branca (Grotta Funda), e o outro junto à Serra do Mendanha (Mendanha). Tal distribuição ocorre tanto para o padrão anual, como para o sazonal, presente nas quatro estações do ano. As diferenças do atual resultado para o apresentado em DOM09 ficam no âmbito de alguns pequenos detalhes em termos de valores médios de precipitação. Na análise espacial/sazonal obtida desta climatologia de 20 anos, entre os resultados mais importantes, ressalta-se o núcleo de chuvas máximas junto ao maciço da Tijuca, ocorrendo na primavera. Entretanto, numa análise para o MRJ, como um todo, o verão se apresenta como a estação mais chuvosa, estando esses resultados em acordo com DOM09. De uma forma geral, a região de precipitações mínimas se encontra na porção nordeste da cidade, ao longo de todo o ano, englobando principalmente as estações da Penha e do Irajá. Na análise do ciclo anual de precipitação e de dias úmidos para diversas estações localizadas em pontos diferentes da cidade, evidencia-se que a estação chuvosa se concentra entre os meses de outubro e março. Observa-se os máximos (mínimos) de precipitação e dias úmidos em janeiro (agosto). Destaca-se também a grande variabilidade espacial da precipitação, sendo um exemplo interessante a comparação entre as estações da Tijuca e da Penha, onde a primeira, localizada junto a uma área montanhosa registra elevados valores de precipitação e de dias úmidos, enquanto a segunda, localizada em uma região de baixada registra uma quantidade bem menor de precipitação e de dias úmidos que a primeira. Na climatologia atual ressalta-se também a distribuição desigual da precipitação ao longo do ano, ocorrendo em média para o MRJ cerca de 33% da precipitação anual em apenas 6,6 dias, quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95. Em relação aos dias úmidos (total pluviométrico diário maior ou igual a 1 mm), verifica-se em torno de 94 dias com valores decaindo do verão para o inverno e voltando a subir na primavera. O maior valor anual de dias úmidos é encontrado

na estação do Sumaré (124 dias) e o menor valor na estação da Penha (86 dias), sendo este resultado semelhante ao encontrado por DOM09.

Com relação a climatologia de ECI, de maneira geral, os resultados demonstram que os máximos de ECIs ocorrem nas regiões mais chuvosas da cidade, localizadas próximos aos maciços, com máximo de 8,0 dias/ano no Sumaré e no Mendanha. O mínimo é observado na Tijuca e Saúde (5,7 dias/ano). A respeito da frequência de ocorrência de ECIs em toda a cidade, pode-se esperar um total de 30 dias de ECIs por ano, com a maior parte deles (70%) ocorrendo no período chuvoso, entre dezembro e abril. Todavia, apesar da baixa frequência de ocorrência no inverno (7,2%) e na primavera (18,2%), medidas de precaução deveriam ser adotadas também nesses meses. Em relação a possível mudança na frequência de ocorrência de ECIs, investiga-se as séries temporais dos totais anuais de dias de ECIs. Os resultados para Piedade são surpreendentes, com notável aumento de dias de ECIs, que ocorre também nos demais postos pluviométricos, apesar do curto período de tempo analisado.

5 Estudo do Evento de Chuva Intensa de 15 de fevereiro de 2018

A Tabela 5.1 apresenta um esquema de procedimentos estratégicos, sugeridos por Silva Dias (1987) e Nascimento (2005), para previsão de tempestades convectivas severas. Neste capítulo o foco é dado aos níveis 1 e 2 desses procedimentos, isto é, a análise de parâmetros de tempo severo desde o reconhecimento de padrões atmosféricos 48 horas antes até poucas horas antes do ECI. Serão contempladas análises da estrutura e da evolução dos fenômenos sinóticos ocorridos e reconhecimento de padrões atmosféricos em simulações realizadas no modelo Eta para verificar os índices que se mostraram como melhores ferramentas à formação deste ECI.

Tabela 5.1 – Esquema de estratégia operacional aplicável à previsão de tempestades convectivas severas (baseada em Nascimento, 2005). Cada coluna representa um nível na escala temporal de previsão convectiva, sendo que a primeira linha contém o principal procedimento para identificação de situações favoráveis ao desenvolvimento de tempestades severas em cada nível, e a terceira linha apresenta as principais ferramentas a serem utilizadas.

<u>NÍVEL 1</u>	<u>NÍVEL 2</u>	<u>NÍVEL 3</u>
Reconhecimento de padrões atmosféricos	Análise de parâmetros de tempo severo	<i>Nowcasting</i>
5 A 2 DIAS ANTES DO EVENTO	1 DIA A POUCAS HORAS ANTES DO EVENTO	DE POUCAS HORAS ANTES DO EVENTO A DURANTE O EVENTO
Observações sinóticas; Modelos Atmosféricos Globais; modelos Regionais; modelos conceituais.	Sondagens atmosféricas; modelos de mesoescala; modelos conceituais; redes de observação em mesoescala; imagens de satélite; rotinas de mesoanálise objetiva; índices de instabilidade	Radar meteorológico; detectores de descargas atmosféricas; satélite meteorológico; rotinas de mesoanálise objetiva; modelos numéricos em escala convectiva
Proximidade da ocorrência do evento convectivo		
		

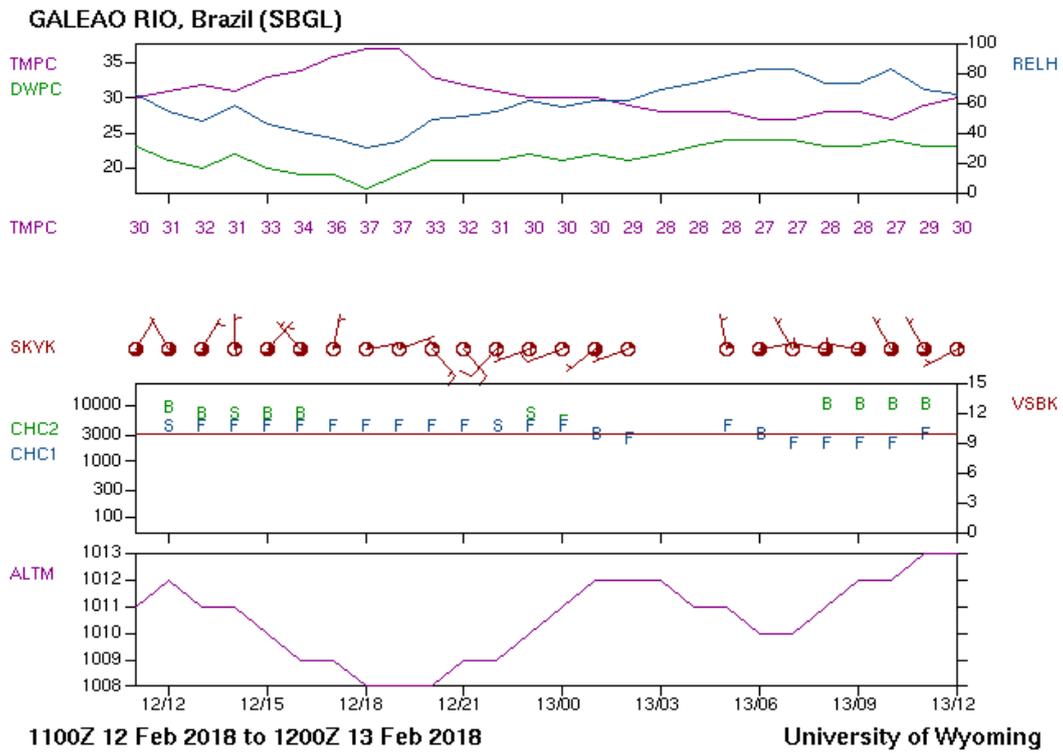
O ECI estudado ocorreu entre 23 UTC do dia 14 e 03 UTC do dia 15 de fevereiro de 2018 no MRJ. Esse caso foi selecionado para estudo devido à intensa precipitação (o maior acumulado horário de precipitação desde a criação do Sistema Alerta Rio (1997)) e aos fortes ventos (rajadas de até 90 km/h) gerados durante seu desenvolvimento, provocando interdições em vias, alagamentos, bolsões d'água, destruição de ciclovias entre outros transtornos, além do registro de 6 mortes (Figura 1.2).

Este estudo de caso é elaborado em três etapas: Inicialmente, apresenta-se uma descrição do evento a partir dos dados observacionais. A seguir é feita uma análise sinótica, a partir dos campos gerados com dados da Reanálise CFSRv2. Em seguida, é feita uma análise em mesoescala, utilizando-se as integrações do modelo regional Eta com resolução de 1 km. O objetivo de simular índices meteorológicos de tempo severo é identificar fatores dinâmicos e termodinâmicos que possam ter contribuído para a ocorrência do evento.

5.1 Descrição do ECI a partir de Dados Observacionais

Analisando os dados de METAR dos Aeroportos do Galeão e de Santa Cruz (Figura 5.1), verifica-se que a entrada do SF no MRJ ocorreu entre 18 UTC do dia 12 de fevereiro e 03 UTC do dia 13 de fevereiro. Tal análise foi feita considerando o giro do vento do quadrante norte para o quadrante sul, a queda acentuada de temperatura, o aumento da umidade relativa e o aumento da nebulosidade em ambos os aeroportos, principalmente no aeródromo de Santa Cruz (Figura 5.1 b). No dia 14/02 a precipitação acumulada em 24 horas (entre 00 e 23 UTC) na estação Santa Cruz do Alerta Rio, associada à passagem do SF, foi de 71,6 mm, já classificada como muito intensa (superior ao seu percentil 99, como mostra a Tabela 4.1). Na Ilha do Governador, o total em 24 h no dia 14/02 foi de 0,8 mm/dia, caracterizando uma chuva fraca (inferior ao seu percentil 75, conforme Tabela 4.1).

(a)



(b)

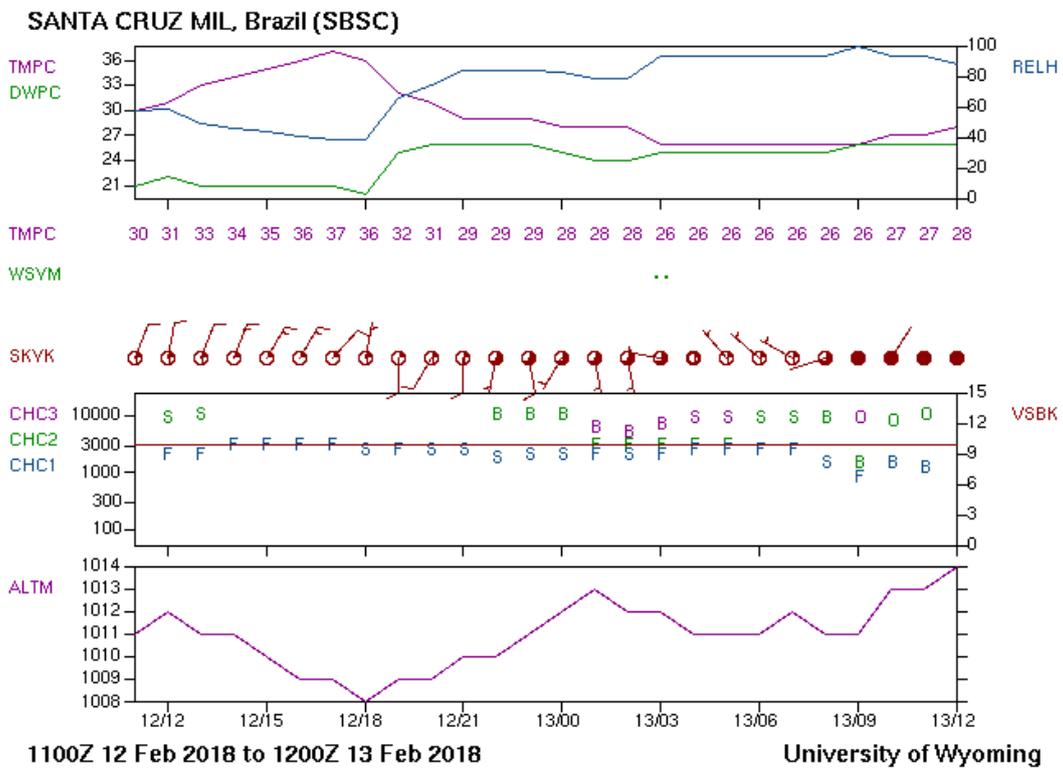


Figura 5.1 – Meteogramas dos aeródromos de (a) Galeão e (b) Santa Cruz. Fonte: <http://weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/samerica.shtml>.

A Figura 5.2 apresenta a série temporal dos acumulados de precipitação a cada 15 minutos, desde o início da chuva no MRJ, em 14/02/18 – 17 UTC, até 15/02/18 - 05 UTC, em todos os postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio. Nota-se uma precipitação contínua em alguns postos ao longo do dia 14/02, inferior a 10 mm/15 min, provocada pela passagem do SF no MRJ. A partir de 15/02 – 01 UTC, verifica-se valores significativos de acumulados de precipitação em 15 minutos, sendo os maiores acumulados registrados entre 01:45 UTC de 14/02 e 02:45 de 15/02, chegando a 48,4 mm/15 min na estação do Rio Centro. Tal valor é cerca de 6 vezes maior do que o percentil 99 dessa estação que é de 7,6 mm/15 min, sendo, portanto, caracterizado como uma chuva muito intensa.

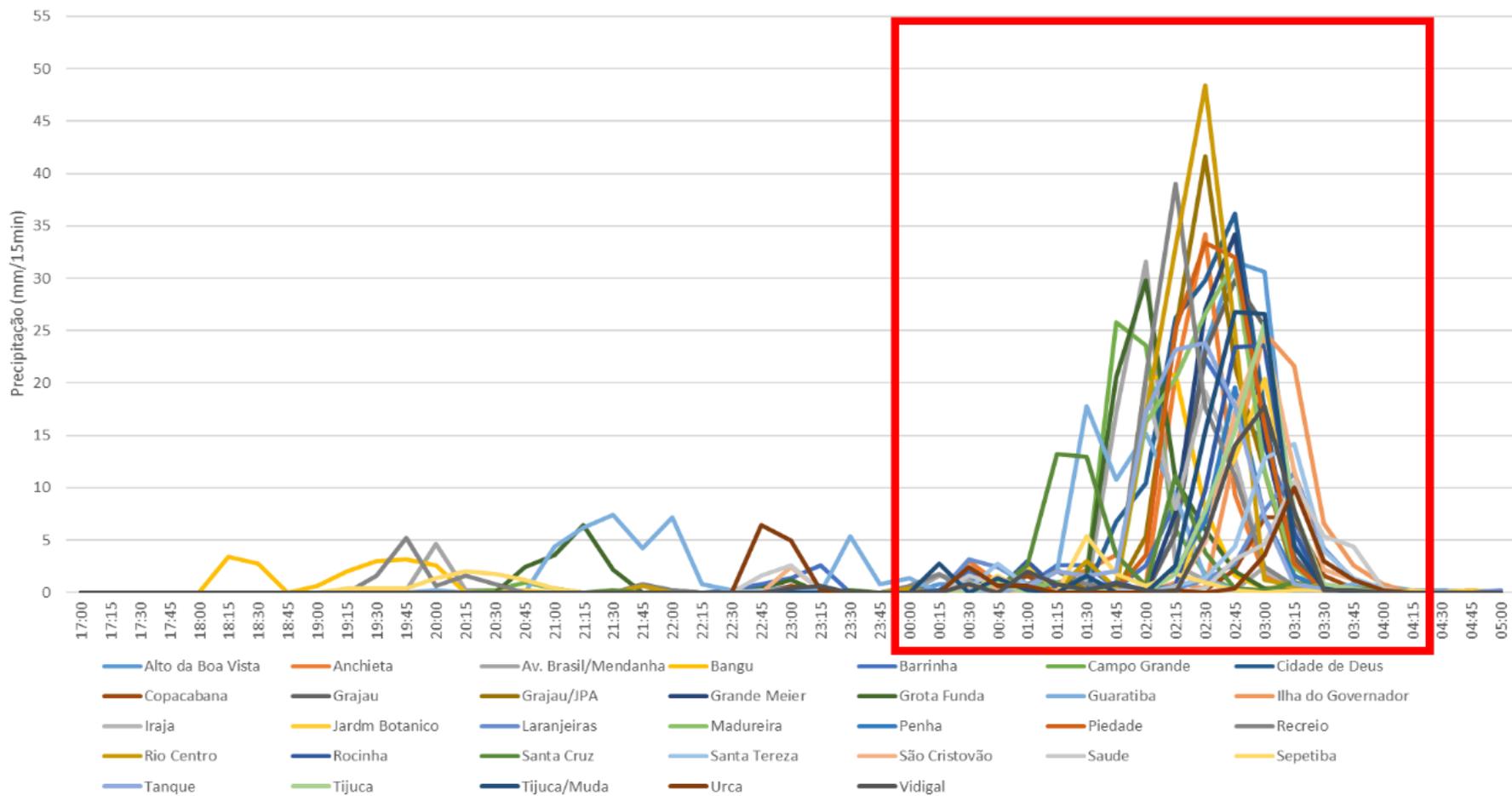


Figura 5.2 – Série temporal da precipitação (mm/15 min) entre 14/02/18 - 17 UTC e 15/02/18 – 05 UTC em todos os postos pluviométricos do Alerta Rio. O período de ocorrência do ECI encontra-se destacado no quadrado vermelho.

A Figura 5.3 exibe a distribuição temporal da precipitação no período mais chuvoso do ECI, nas 4 localidades mais afetadas pelo evento: Rio Centro, Cidade de Deus, Piedade e Estrada Grajau-Jacarepaguá. Observa-se que nos 4 postos, a chuva muito intensa se inicia as 01:45 UTC e se encerra as 03:15 UTC do dia 15/02.

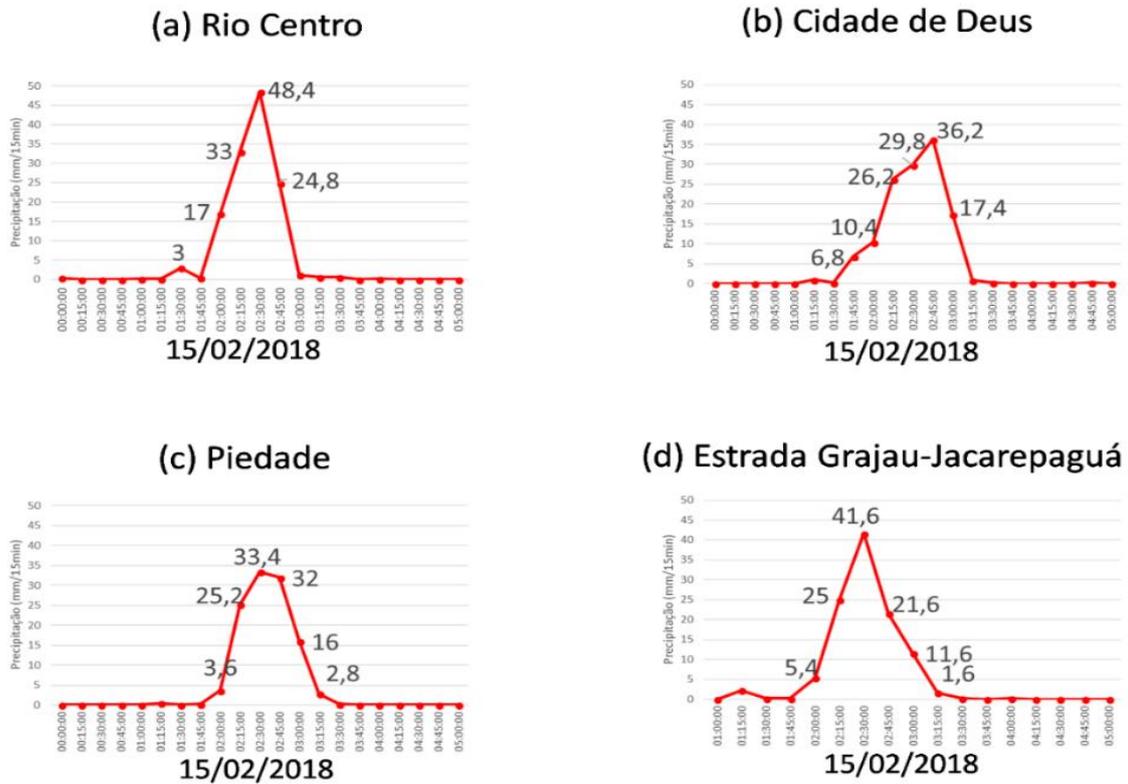
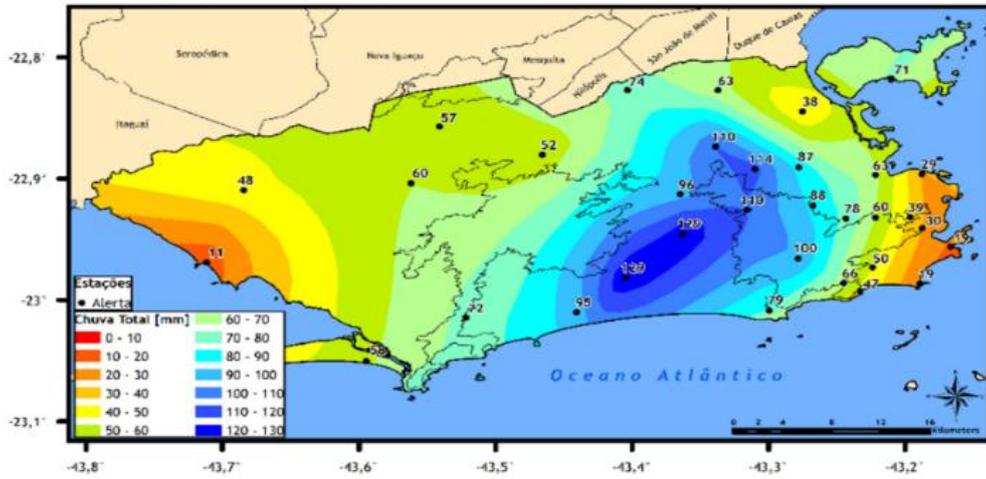


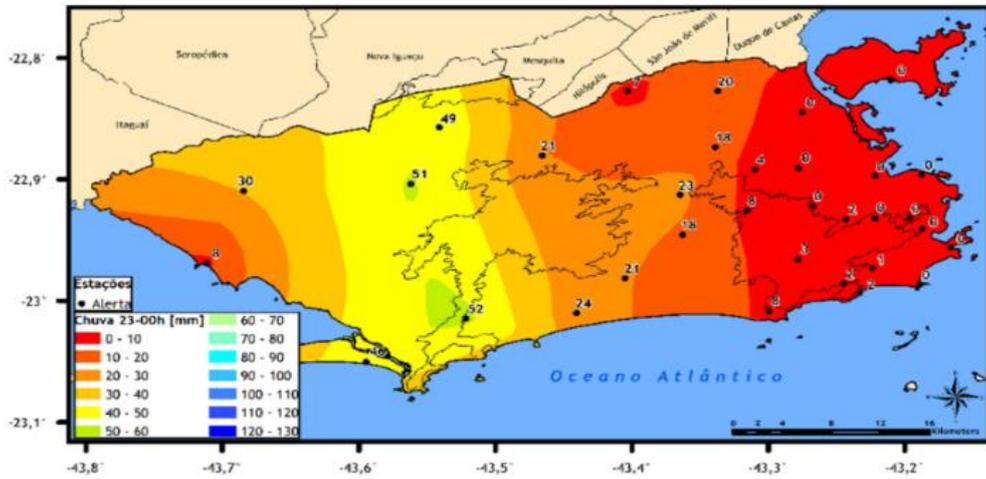
Figura 5.3 – Distribuição temporal da precipitação (mm/15 min) no período mais chuvoso do ECI, nas 4 localidades mais afetadas pelo evento: (a) Rio Centro, (b) Cidade de Deus, (c) Piedade e (d) Estrada Grajau-Jacarepaguá.

A Figura 5.4 apresenta a distribuição espacial da precipitação no período mais intenso do ECI no MRJ, no dia 15/02, acumulada entre 01 e 03 UTC (Figura 5.4a), e também entre 01 e 02 UTC (Figura 5.4b) e entre 02 e 03 UTC (Figura 5.4c). Na Figura 5.4a, observa-se um máximo de precipitação entre os maciços da Tijuca e da Pedra Branca, com valores acima de 120 mm acumulados em apenas 2 horas. Observa-se na Figura 5.4b que na primeira hora de chuva intensa, os máximos de precipitação (entre 50 e 60 mm/h) ficam concentrados na zona oeste do município, enquanto que em outros locais do município, como na zona norte e zona sul, a precipitação é fraca ou nula. Entre 02 e 03 UTC (Figura 5.4c), observa-se um deslocamento da chuva mais intensa para o leste do MRJ, sendo registrados os máximos de precipitação nas regiões próximas ao maciço da Tijuca, com valores acima de 100 mm/h nos postos do Rio Centro, Cidade de Deus e Piedade.

(a) 15/02/2018 – 01-03 UTC



(b) 15/02/2018 – 01-02 UTC



(c) 15/02/2018 – 02-03 UTC

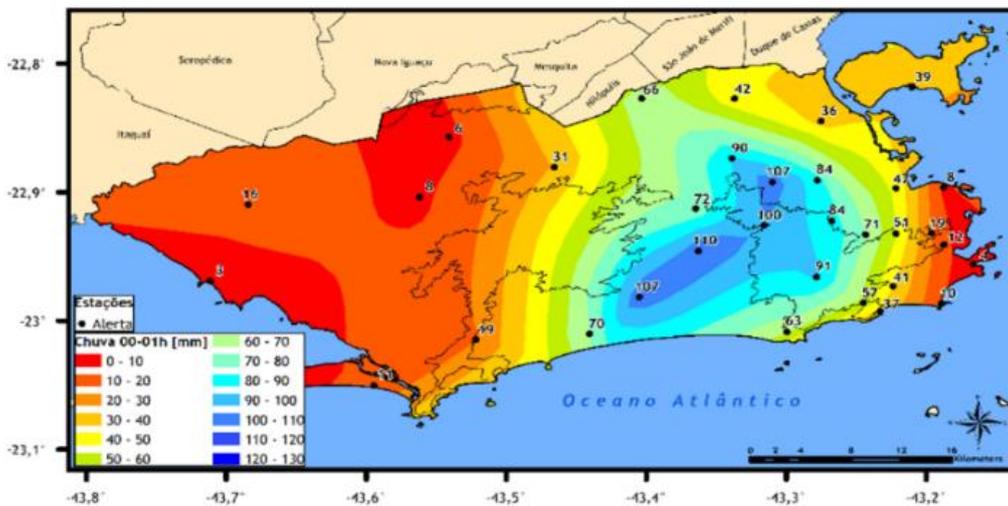


Figura 5.4 – Distribuição espacial da precipitação (mm) acumulada no dia 15/02/18 entre: (a) 01 e 03 UTC; (b) 01 e 02 UTC e (c) 02 e 03 UTC.

A Figura 5.5 compara os maiores totais pluviométricos em 1 hora do caso estudado considerando a climatologia (1997-2016) do mês de fevereiro. Verifica-se que dentre os 33 postos que se encontram em funcionamento no sistema Alerta Rio, 23 postos ultrapassaram, no mínimo, metade de sua média climatológica de precipitação esperada para o mês de fevereiro, sendo que em 3 postos (Rio Centro, Cidade de Deus e Estrada Grajaú/Jacarepaguá) seus valores climatológicos foram ultrapassados. Comparando-se os acumulados horários de precipitação deste ECI com os 10 maiores já registrados no Sistema Alerta Rio desde a sua criação, nota-se que 5 registros ocorreram neste ECI, sendo o maior deles (123,2 mm/h) acumulado no posto pluviométrico do Rio Centro entre 00:45 até 01:45 UTC do dia 15/02/18 (<http://alertario.rio.rj.gov.br/maiores-chuvas/>).

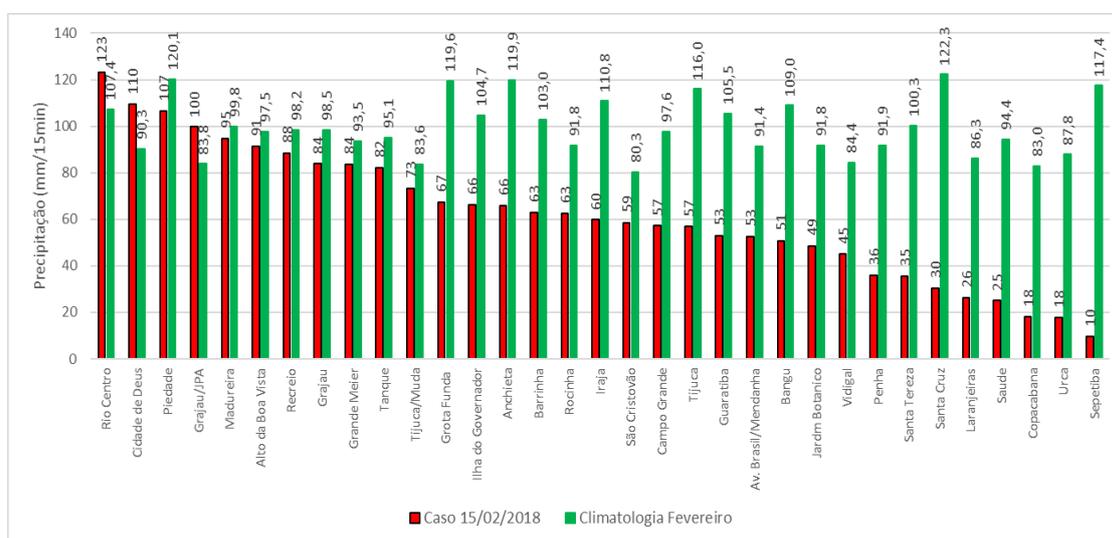
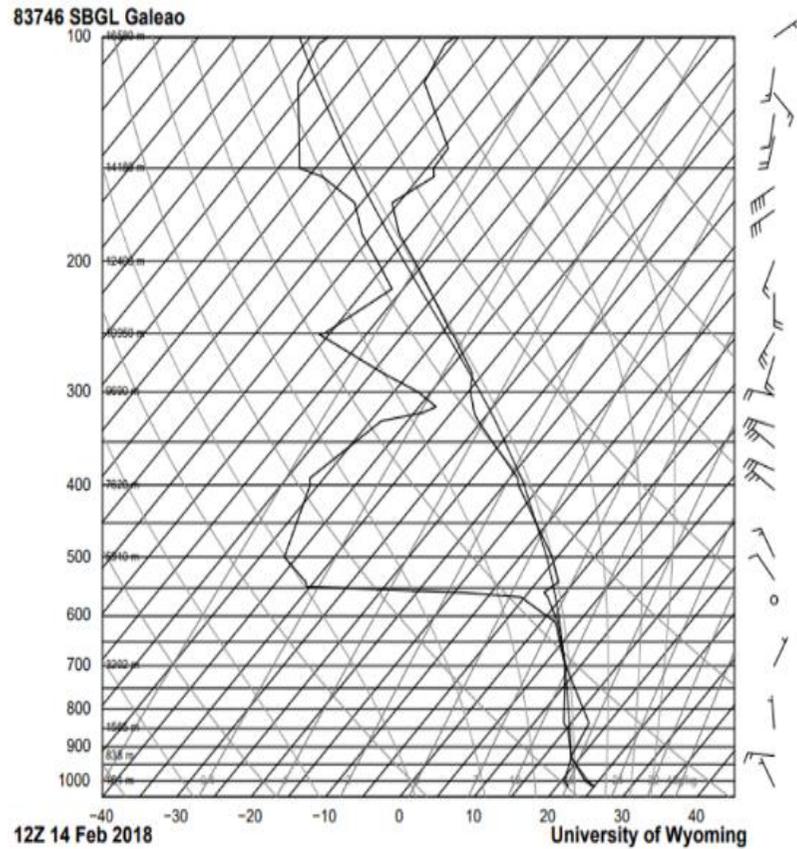


Figura 5.5 – Maiores acumulados de precipitação em 1 hora durante o ECI (vermelho) e climatologia da precipitação do mês de fevereiro (1997-2016) para os 33 postos pluviométricos do sistema Alerta Rio.

A Figura 5.6 apresenta as sondagens do aeroporto do Galeão nos horários de 14 de fevereiro às 12 UTC e dia 15 de fevereiro às 00 UTC. As sondagens do Galeão mostram alta instabilidade sobre o Rio de Janeiro, com valores significativos de indicadores de instabilidade desde às 12 UTC do dia 14 de fevereiro de 2018 sendo intensificado na sondagem das 00 UTC do dia 15 de fevereiro. Na sondagem de 14 de fevereiro (Figura 5.6 a) o Índice K apresenta um valor de 38°C, o índice TT registrada um valor de 44,1°C, e o LI 0,69°C e a verifica-se um baixo valor de CAPE (184.7 J/Kg). Na sondagem das 00 UTC do dia 15 de fevereiro de 2018, observa-se um aumento significativo nos índices, sendo o valor de K igual a 41°C, o índice TT atingindo 48°C, o LI com -3,77°C e a CAPE com valores superiores a 1100 J/Kg. A evolução desses aspectos termodinâmicos ao longo do dia, como a instabilidade e a interação com mecanismos forçantes para convecção, explicam certas características severas do fenômeno.

(a) 12 UTC – 14/FEVEREIRO/2018



(b) 00 UTC – 15/FEVEREIRO/2018

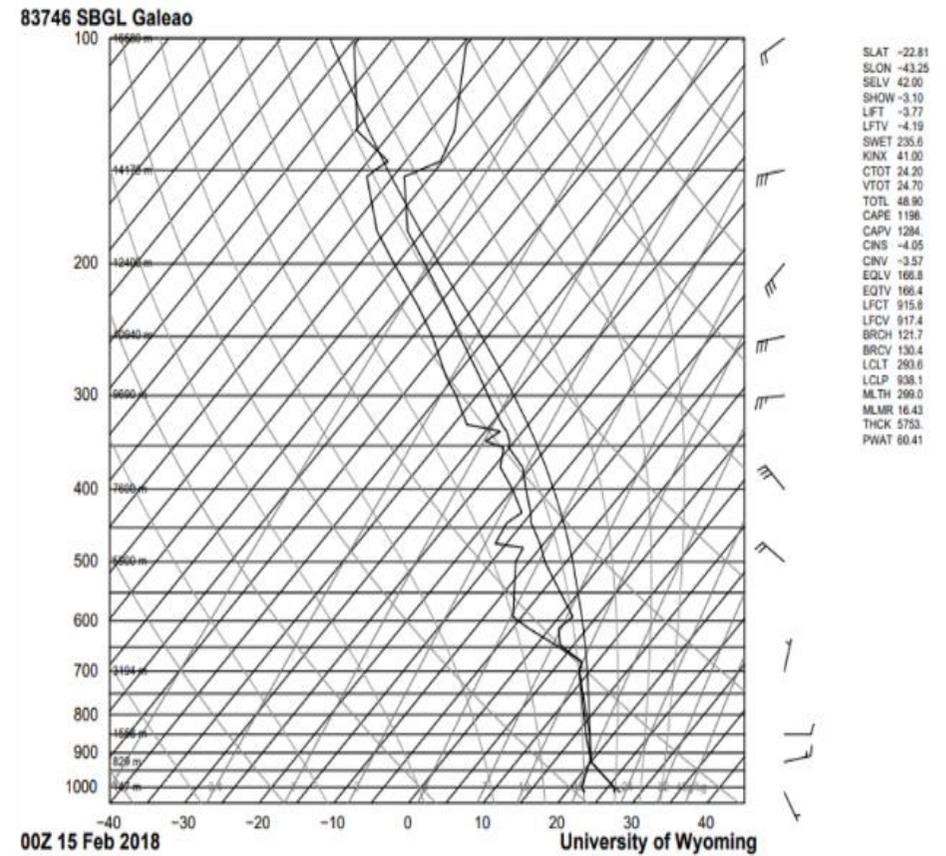


Figura 5.6 – Sondagens da estação automática de altitude do aeroporto do Galeão em (a) 14 de fevereiro às 12 UTC e (b) 15 de fevereiro às 00 UTC.

5.2 Análise Sinótica

Nesta seção se apresenta uma análise das condições atmosféricas ocorridas durante o evento, a partir dos campos gerados com dados de Reanálise do CFSRv2. O objetivo é identificar os principais sistemas em escala sinótica que contribuíram para a ocorrência do ECI.

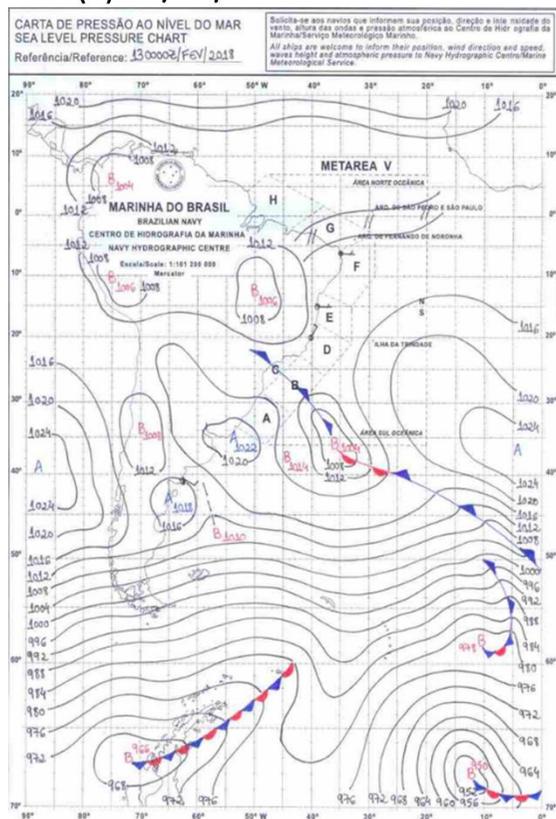
A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam, respectivamente, as cartas sinóticas do SMM – MB e as imagens do satélite GOES-16 (canal 14 – 11.2μ) durante o período de 13/02 – 0000 UTC até 15/02 – 1200 UTC. Nota-se na Figura 5.7a (dia 13/02 – 0000 UTC), a presença de um SF atuando sobre o estado de São Paulo, associado a um centro de baixa pressão de 1004 hPa, em aproximadamente $35^{\circ}\text{S}/040^{\circ}\text{W}$. Na carta de 13/02 – 12 UTC (Figura 5.7b), o SF atinge o ERJ e permanece atuando na região até o dia 14/02 – 00 UTC, conforme mostrado na Figura 5.7c. Na Figura 5.7d (dia 14/02 – 12 UTC) se nota a formação de um centro de baixa pressão, com valor de 1014 hPa, sobre o litoral do Rio de Janeiro. No dia 15/02 – 00 UTC (Figura 5.7e) se observa, em superfície, um cavado atuando sobre o ERJ. A permanência desse cavado após a passagem do SF, favoreceu a ocorrência de instabilidades sobre a região, com formação de sistemas convectivos durante a noite do dia 14 e madrugada do dia 15/02. A partir das 15/02 – 12 UTC (Figura 5.5f), o cavado se desloca para sudeste atuando sobre o oceano, afastando-se da região de estudo.

A partir das imagens do canal 14 (11.2μ) do satélite GOES-16 (Figura 5.8), é possível acompanhar as áreas de instabilidades que se formaram devido à passagem da frente fria sobre o Sudeste do Brasil. A partir de 13/02 – 00 UTC (Figura 5.8a), verifica-se a atuação do SF sobre o litoral do estado de São Paulo, com a presença de nuvens convectivas atuando sobre a região. No dia 13/02 – 12 UTC (Figura 5.8b), verifica-se que as zonas de instabilidade se movimentam lentamente junto com o deslocamento do SF, que atua na divisa dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. Na Figura 5.8c, nota-se às 00 UTC do dia 14/02, a atuação da frente fria sobre o MRJ, porém apresentando sistemas convectivos menos intensos comparado ao horário anterior. Na Figura 5.8d, relativa ao dia 14/02 – 12 UTC, o SF já se encontra mais a norte do MRJ e a presença de nuvens convectivas é observada principalmente sobre o oceano. Entretanto, a partir de 15/02 – 00 UTC, verifica-se a presença de um núcleo convectivo bem intenso sobre o MRJ, como observado na Figura 5.8e. Esse núcleo convectivo, foi responsável por ventos sustentados de 65 km/h e rajadas acima de 90 km/h (no aeroporto de Santa Cruz, Zona

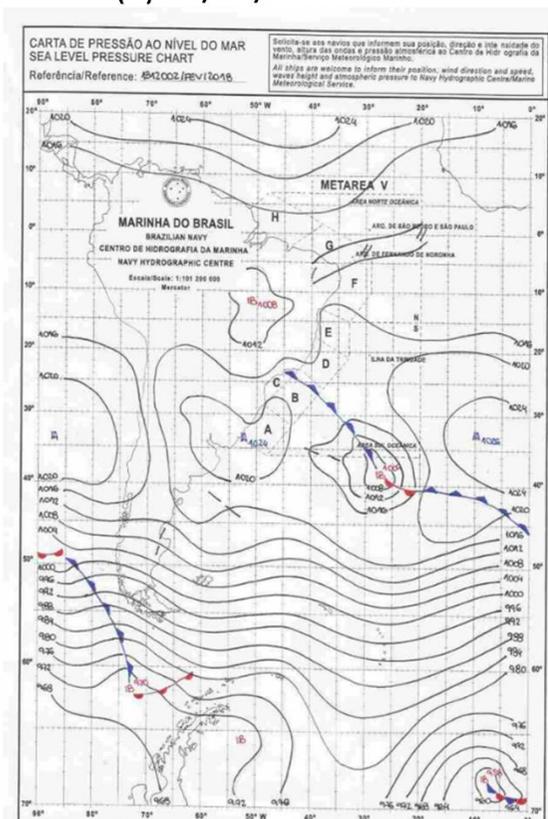
Oeste da cidade) e chuvas intensas/muito intensas no MRJ. A partir de 15/02 – 12 UTC (Figura 5.8f), apesar da presença de nuvens convectivas sobre o oceano, já não se observa atividade convectiva sobre o MRJ.

A passagem desse SF sobre o litoral do estado de São Paulo também deflagrou chuvas e ventos muito fortes. No dia 13/02 choveu 110,6 mm em apenas 3 horas em Ilhabela (SP). De acordo com o CPTEC, em São Sebastião, o grande volume de chuvas provocou alagamentos e inundações e duas famílias ficaram ilhadas. Os ventos fortes também paralisaram a balsa entre São Sebastião e Ilhabela, por 4 horas. Na Baixada Santista, a chuva intensa acompanhada de fortes rajadas de ventos, ocasionou quedas de árvores, alagamentos e até deslizamentos (Fonte: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/sao-sebastiao-e-ilhabela-decretam-estado-de-emergencia-por-cao-da-chuva.ghtml>).

(a) 13/02/2018 – 00 UTC



(b) 13/02/2018 – 12 UTC



(c) 14/02/2018 – 00 UTC

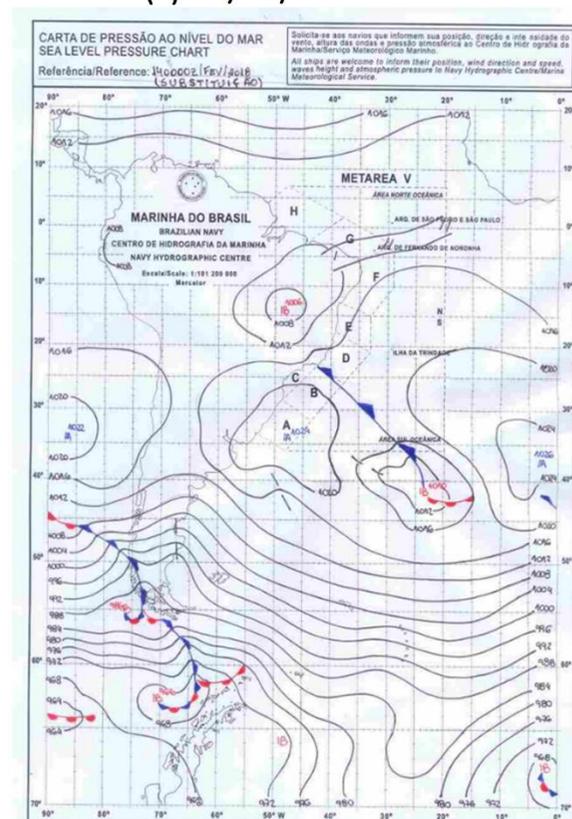
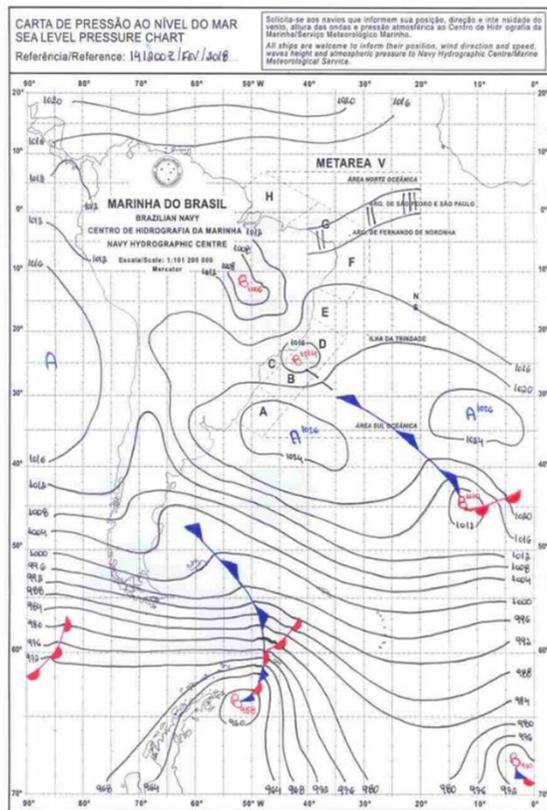
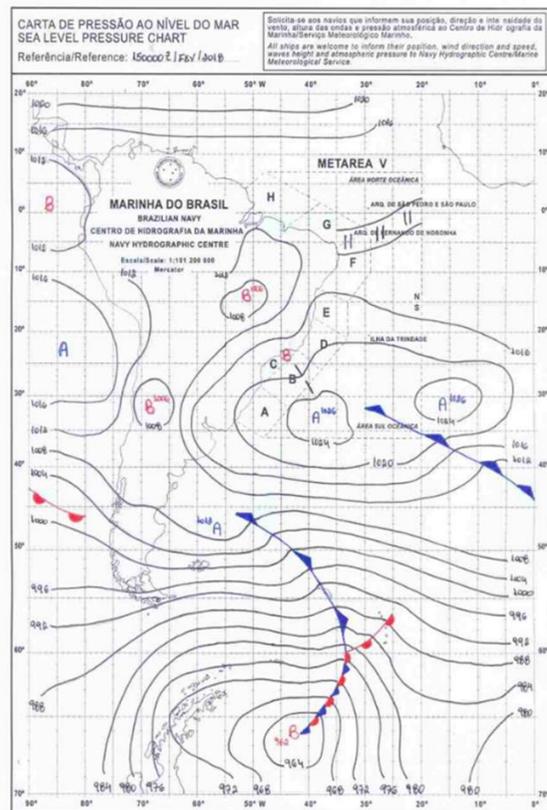


Figura 5.7 – Cartas de pressão ao nível médio do mar (a cada 4 hPa): (a) 13/02/18 – 00 UTC, (b) 13/02/18 – 12 UTC, (c) 14/02/18 – 00 UTC, (d) 14/02/18 – 12 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 12 UTC. Fonte: Serviço Meteorológico Marinho da Marinha do Brasil

(d) 14/02/2018 – 12 UTC



(e) 15/02/2018 – 00 UTC



(f) 15/02/2018 – 12 UTC

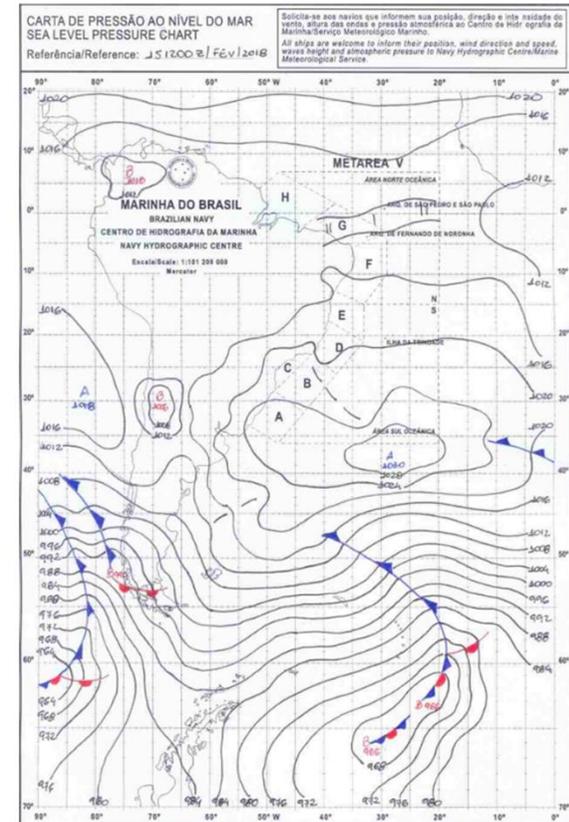


Figura 5.7 – Final.

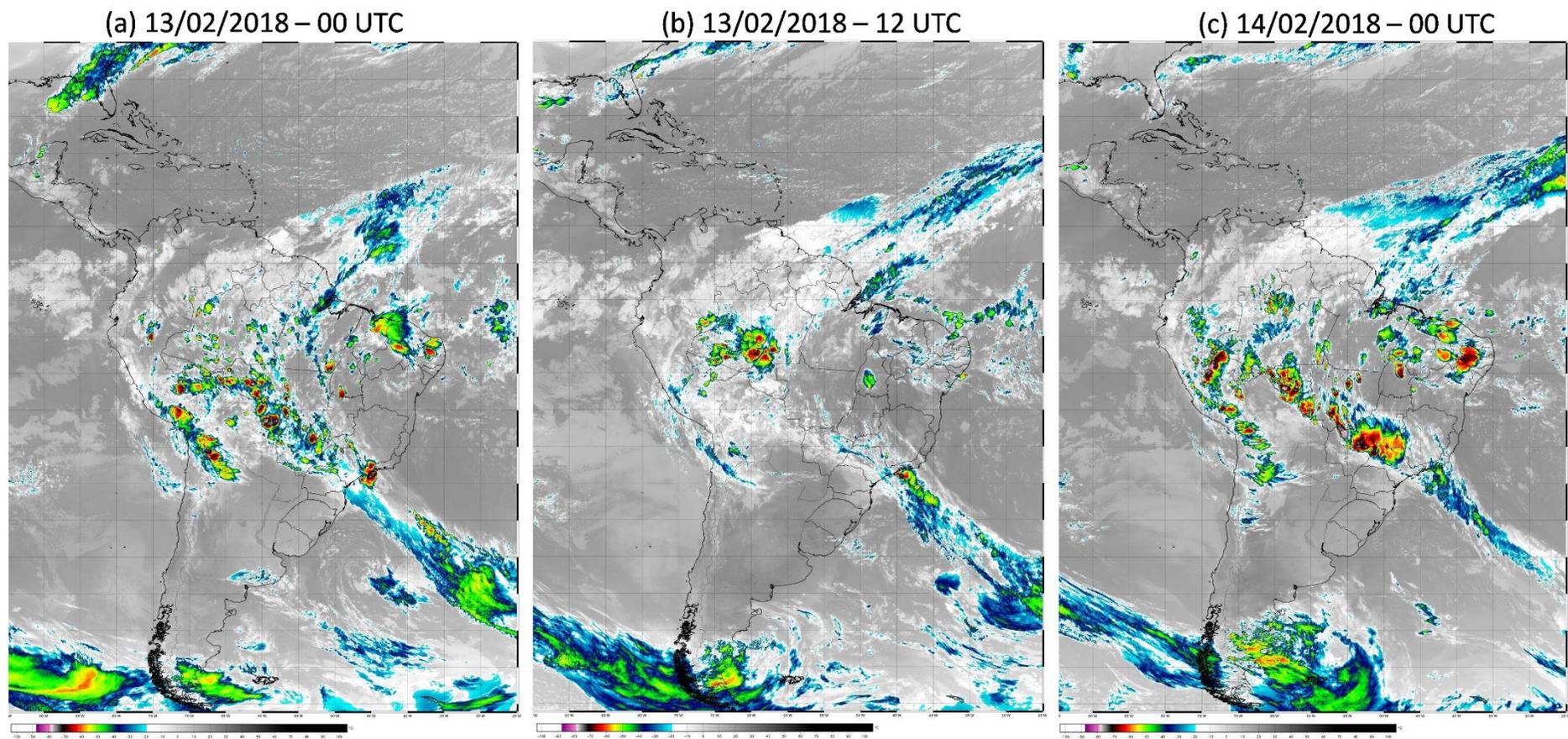
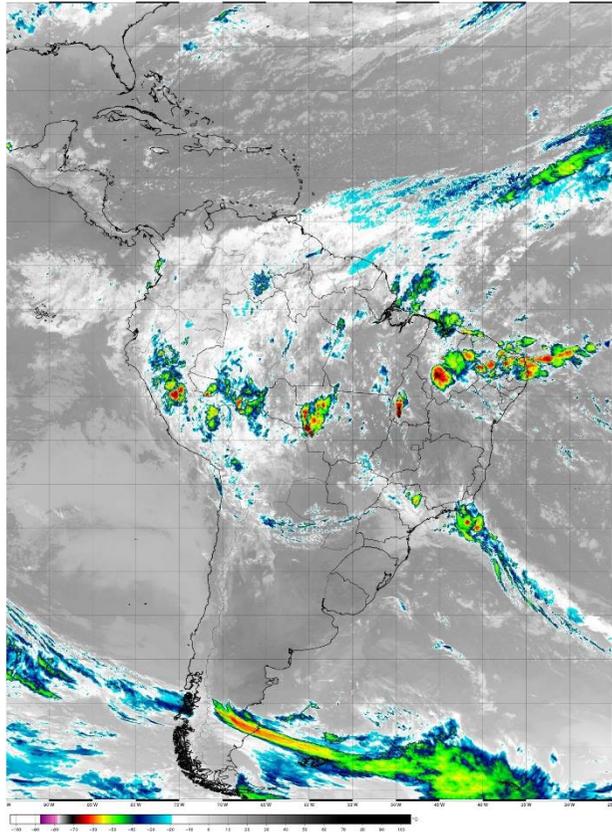
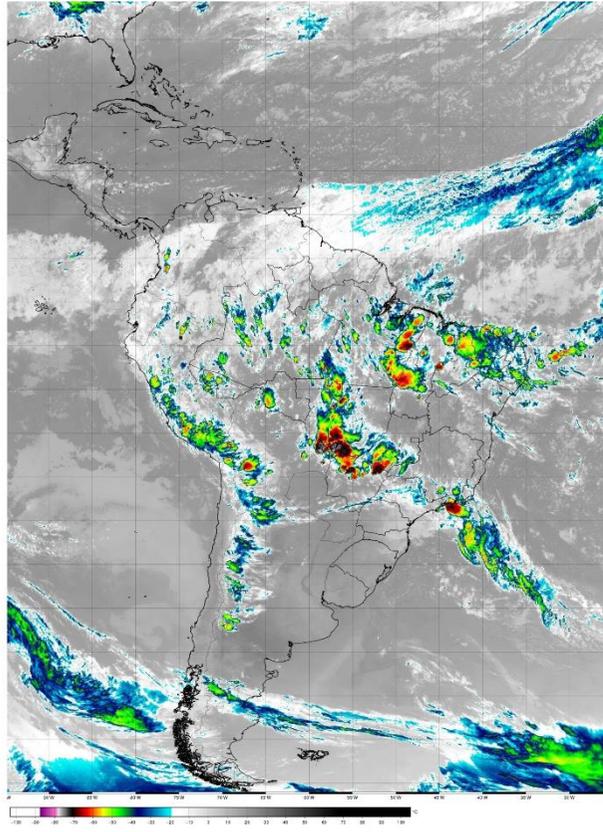


Figura 5.8 – Imagens de satélite do canal 14 (11.2μ) do GOES-16: (a) 13/02/18 – 00 UTC, (b) 13/02/18 – 12 UTC, (c) 14/02/18 – 00 UTC, (d) 14/02/18 – 12 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 12 UTC. Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

(d) 14/02/2018 – 12 UTC



(e) 15/02/2018 – 00 UTC



(f) 15/02/2018 – 12 UTC

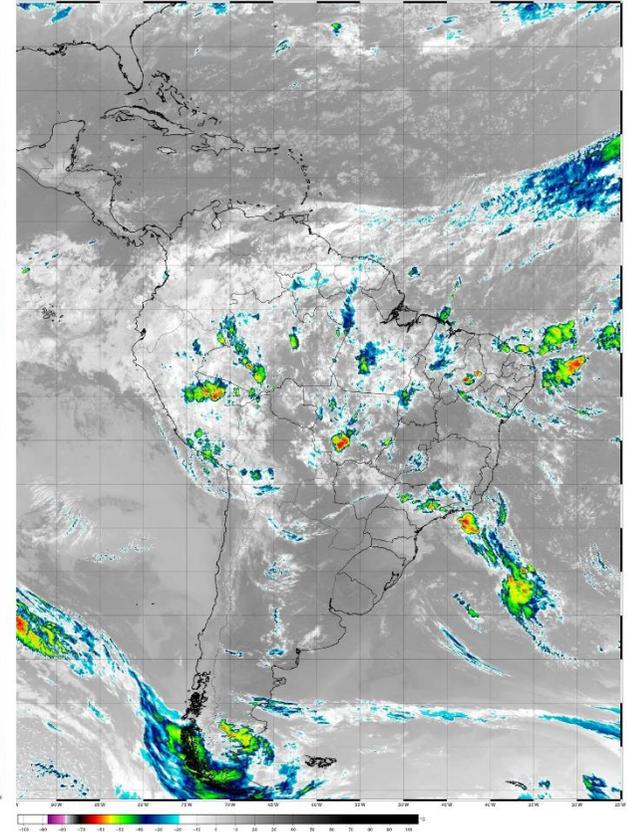


Figura 5.8 – Final.

A Figura 5.9 apresenta os campos de PNMM, vento em 1000 hPa e de espessura na camada 500-1000 hPa, a fim de obter uma visão da temperatura do ar na camada e também da inclinação do sistema. No dia 14 – 00 UTC (Figura 5.9a) se observa no campo de PNMM a atuação de um cavado no litoral do ERJ e um centro de baixa pressão de 1006 hPa localizado em 42°S/024°W. Na imagem de satélite desse dia no horário das 00 UTC (Figura 5.8c), observa-se o SF sobre o ERJ, estendendo-se sobre o oceano, ocluindo no centro da baixa pressão de 1006 hPa. Às 06 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.9b), verifica-se o deslocamento desse centro de baixa pressão de 1006 hPa para sudeste e o surgimento de um centro de baixa pressão (24°S/043°W) de 1016 hPa atuando sobre o ERJ. A partir das 12 UTC do dia 14 (Figura 5.9c), nota-se a presença de um cavado e um centro de baixa pressão, com valor de 1018 hPa sobre o ERJ e o centro de baixa pressão, associado ao SF, sobre o Atlântico, desloca-se para sudeste, localizado a leste de 015°W no dia 14 – 12 UTC. Entre às 18 UTC do dia 14 fevereiro (Figura 5.9d) e 00 UTC do dia 15 de fevereiro (Figura 5.9e), o centro de baixa pressão e cavado permaneceram atuando no litoral do ERJ. A partir das 06 UTC do 15 de fevereiro (Figura 5.9f), esses sistemas se enfraquecem sobre o ERJ. Com relação ao cavado de espessura, esse se amplifica e se inclina para oeste a partir das 12 UTC do dia 14 (Figura 5.9c), evoluindo-se para um vórtice ciclônico, em médios e altos níveis, de núcleo relativamente frio no dia 15 – 12 UTC (Apêndice V).

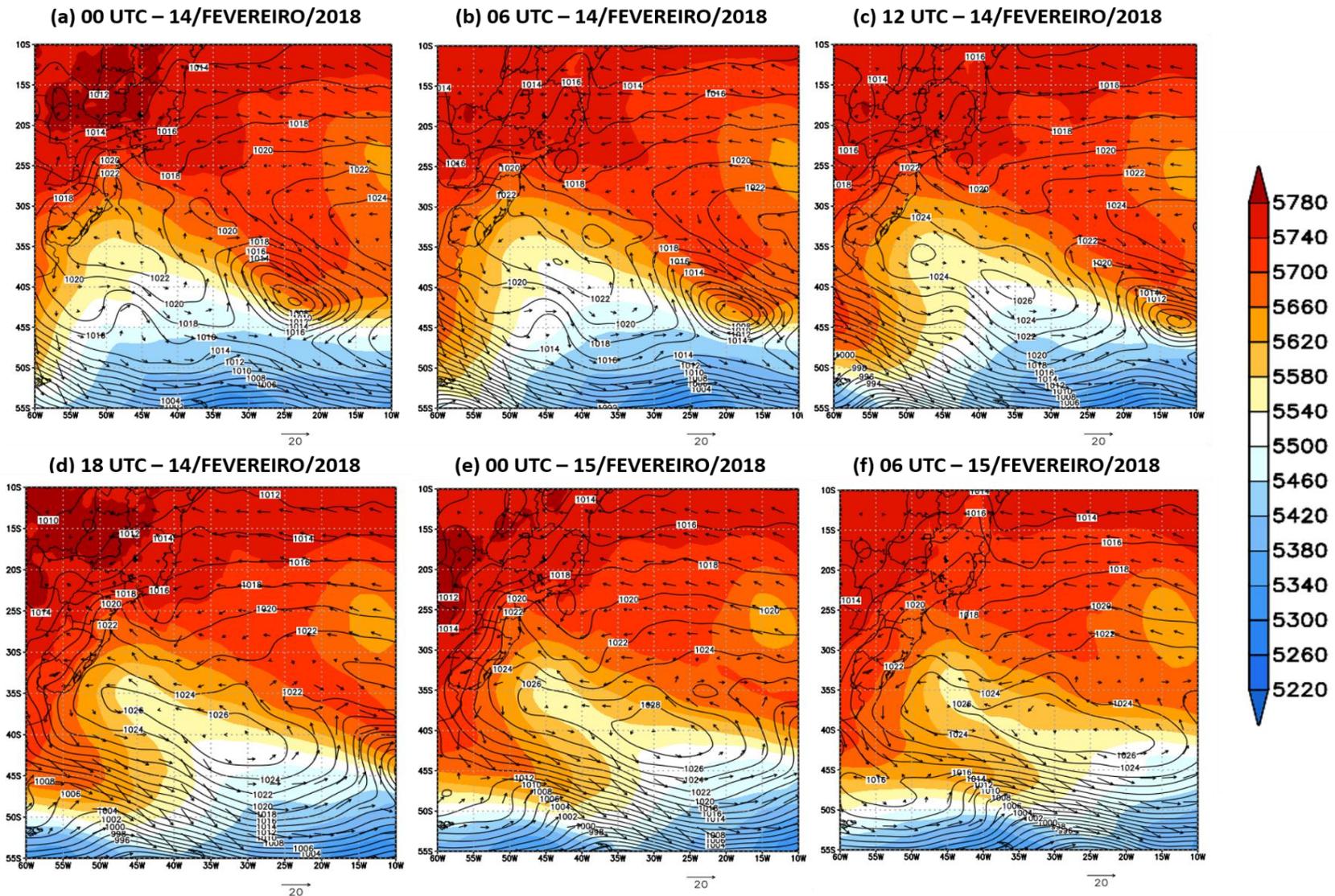


Figura 5.9 – Campos de pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 2 hPa), vento em 1000 hPa e espessura 500-1000 hPa (sombreado a cada 40 mgp): (a) 14/02/18 – 00 UTC, (b) 14/02/18 – 06 UTC, (c) 14/02/18 – 12 UTC, (d) 14/02/18 – 18 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 06 UTC.

Na Figura 5.10 estão apresentados os campos de linhas de corrente e altura geopotencial em 300 hPa. Na Figura 5.10a, relativa as 0000 UTC do dia 14, verifica-se a presença desse cavado no sudeste da América do Sul, deslocando-se para nordeste até 15/02 – 00 UTC (Figura 5.10c). A partir de 15/02 – 12 UTC, o cavado torna-se um vórtice desprendido de núcleo frio e a seguir desloca-se para leste, pelo menos até 15/02 – 18 UTC (Apêndice V).

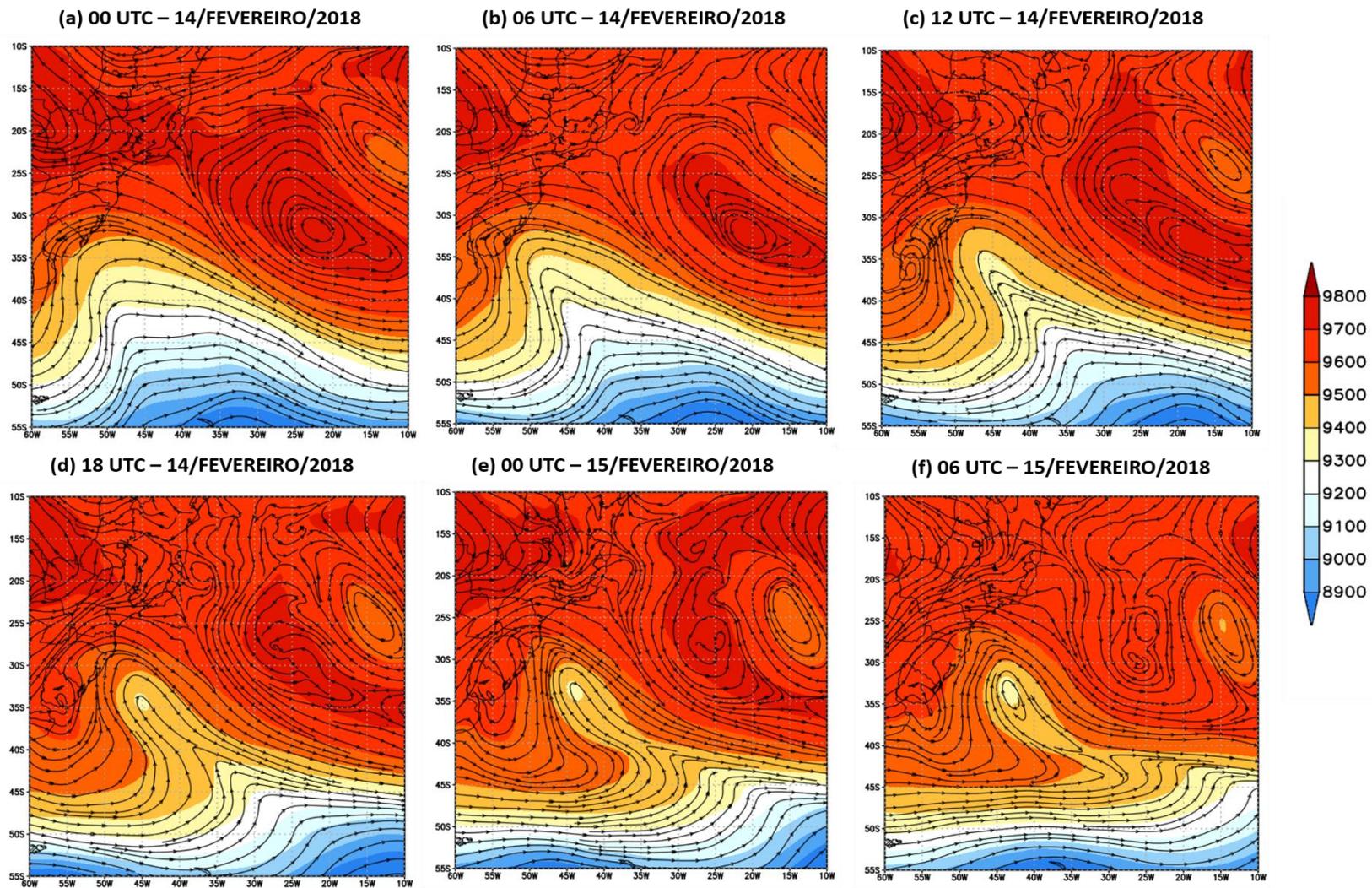


Figura 5.10 – Linhas de corrente e altura geopotencial (sombreado a cada 100 mgp) em 300 hPa: (a) 14/02/18 – 00 UTC, (b) 14/02/18 – 06 UTC, (c) 14/02/18 – 12 UTC, (d) 14/02/18 – 18 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 06 UTC..

Os campos de PNMM e do fluxo de umidade verticalmente integrado entre as camadas de 1000/300 hPa são apresentados na Figura 5.11. No dia 14/02 às 00 UTC, observa-se uma intensa convergência de umidade atuando junto a região do centro de baixa pressão associada ao SF (Figura 5.11a), porém sobre o ERJ se verifica uma fraca intensidade do fluxo de umidade, com valores de até $300 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. A partir das 06 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.11b), com a formação de um centro de baixa pressão no litoral do ERJ, verifica-se um alto fluxo de umidade atuando sobre o local, com valores de até $800 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. A partir do dia 14/02 - 12 UTC (Figura 5.11c), o centro de baixa pressão continua atuando sobre o litoral do ERJ e se nota uma diminuição no fluxo de umidade sobre a região e valores significativos de até $600 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Às 18 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.11d), os valores significativos desse centro de baixa pressão se deslocam para sudeste do litoral do ERJ. Na figura 5.11e, nota-se que o cavado e o centro de baixa pressão junto ao litoral do ERJ permanecem atuando às 00 UTC do dia 15, sendo observado um aumento do fluxo de umidade sobre ERJ, com valores de até $400 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. A partir de 06 UTC do dia 15/02 (Figura 5.11d), já se observa o enfraquecimento do fluxo de umidade sobre o ERJ, com valores significativos de fluxo de umidade atuando sobre o oceano.

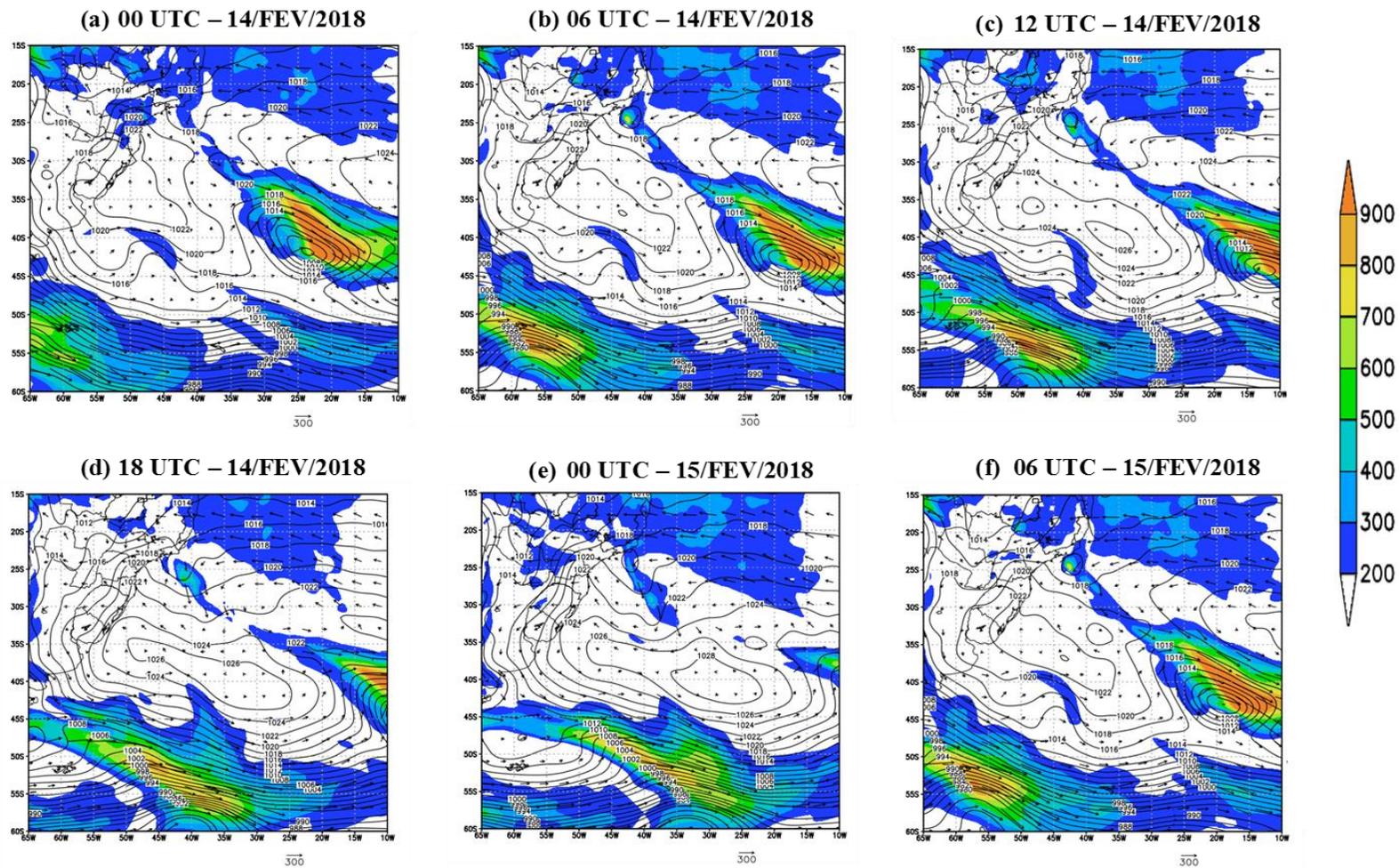


Figura 5.11 – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado entre 300 e 1000 hPa (sombreado a cada $100 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) e pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 2 hPa) em: (a) 14/02/18 – 00 UTC, (b) 14/02/18 – 06 UTC, (c) 14/02/18 – 12 UTC, (d) 14/02/18 – 18 UTC, (e) 15/02/18 – 00 UTC e (f) 15/02/18 – 06 UTC.

5.3 Simulação do Modelo Eta

5.3.1 Precipitação

Uma avaliação subjetiva é realizada confrontando os campos simulados com 48 h de antecedência pelos membros do modelo Eta-1km com a precipitação observada pelo Sistema Alerta Rio, acumulada entre 23 UTC do dia 14 de fevereiro de 2018 e 04 UTC do dia 15 de fevereiro de 2018. A Figura 5.13 apresenta os campos de precipitação observada registrada pelo Sistema Alerta Rio e a Figura 5.13 as simulações do modelo Eta.

Na Figura 5.12 são observados acumulados significativos em todo MRJ, com os maiores valores (acima de 100 mm/6h) concentrados entre os maciços da Tijuca e Pedra Branca. Nas simulações do modelo Eta, são observados valores muito abaixo do registrado durante a ocorrência do ECI. Na simulação BMJ_FER (Figura 5.13.a), são observados acumulados de até 5 mm/6h entre o maciço da Tijuca e Pedra Branca, entretanto, a simulação apresenta dois núcleos máximos com acumulados superando 20 mm/6h próximo ao maciço da Pedra Branca, sendo um ao sul do maciço e outro a oeste, próximo a baía de Sepetiba. A simulação BMJ_ZHAO (Figura 5.13.b) apresenta os maiores valores acumulados de precipitação entre os membros simulados. O membro BMJ_ZHAO apresenta acumulados de precipitação com valores acima de 25 mm/6h e uma distribuição espacial da precipitação mais intensa bem próxima à observada. As simulações KF_FER (Figura 5.12.c) e KFMX_FER (Figura 5.12.d) não conseguem reproduzir acumulados altos de precipitação no MRJ durante o período do ECI.

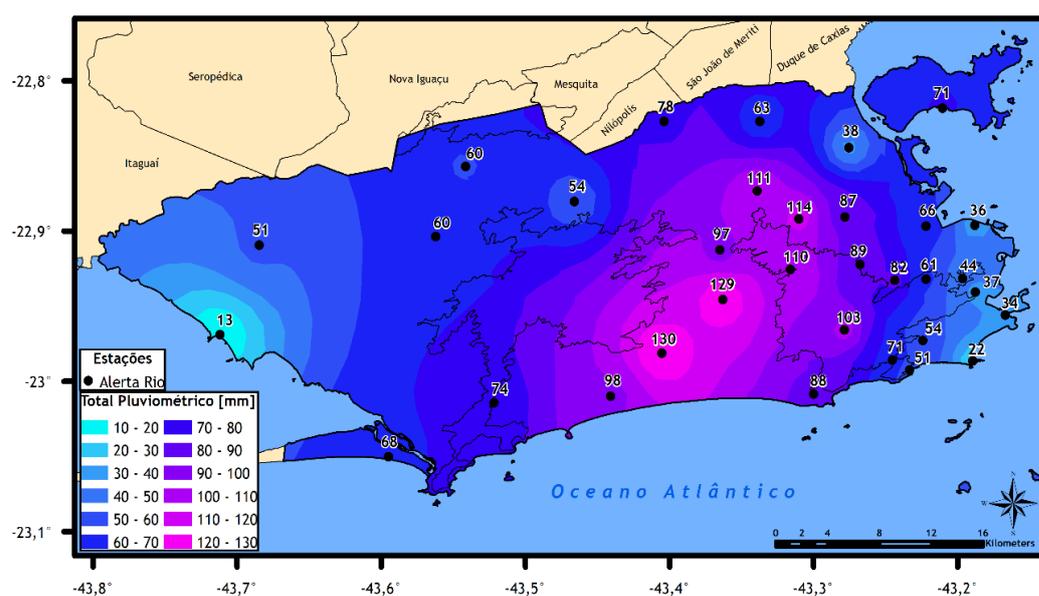


Figura 5.12 – Precipitação acumulada (mm/6h) entre 23 UTC do dia 14/02/2018 e 04 UTC do dia 15/02/2018: Sistema AlertaRio.

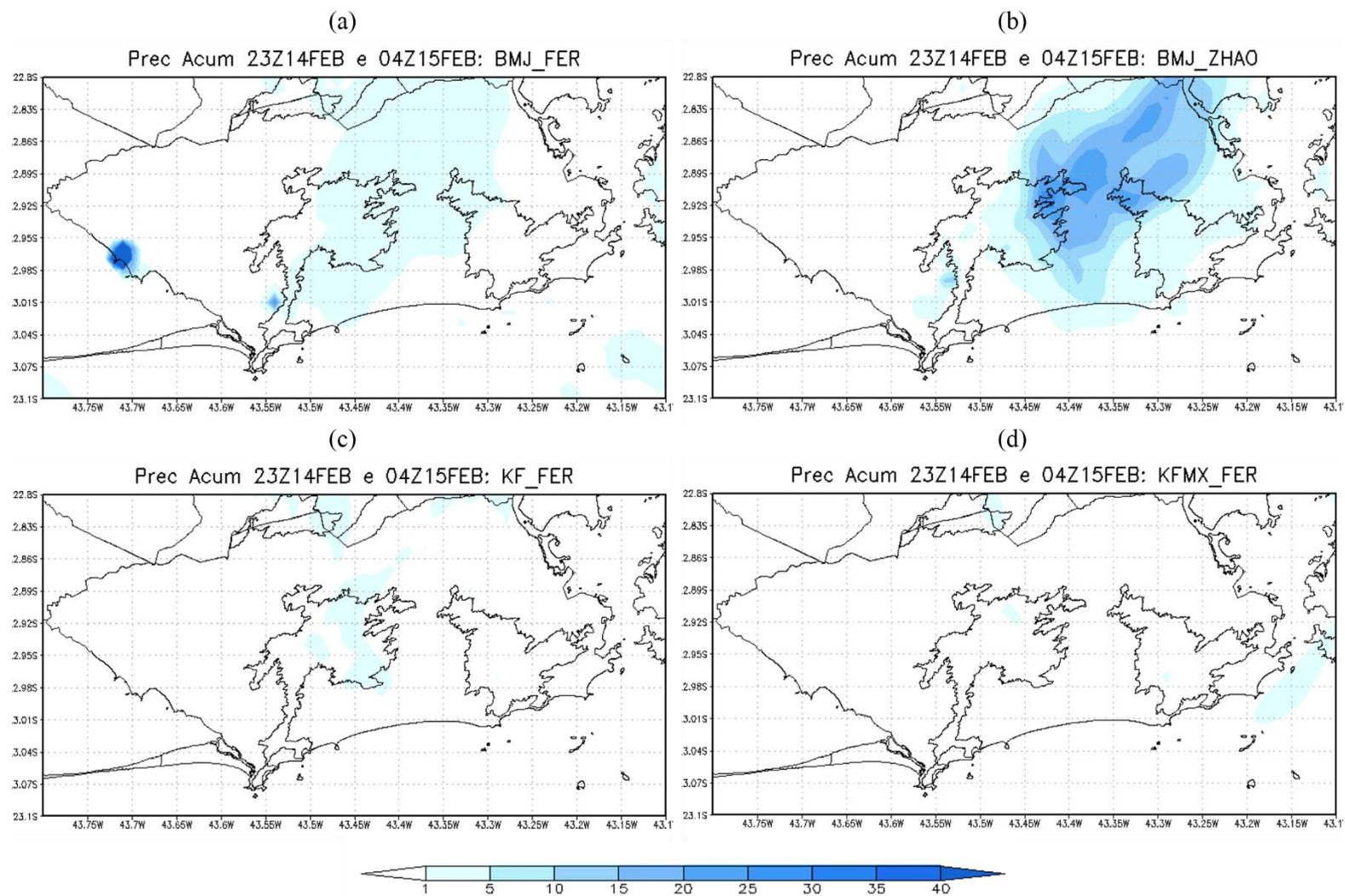


Figura 5.13 - Precipitação Total acumulada (mm/6h) entre 23 UTC do dia 14/02/2018 e 04 UTC do dia 15/02/2018: (a) BMJ_FER, (b) BMJ_ZHAO, (c) KF_FER e (d) KFMX_FER.

Na Figura 5.14 são plotadas a precipitação em grande escala (Figura 5.14a) e precipitação convectiva (Figura 5.14b) acumulada entre 23 UTC do dia 14 de fevereiro de 2018 e 04 UTC do dia 15 de fevereiro de 2018 para verificar qual variável está influenciando a precipitação total (Figura 5.13). Nota-se para este evento, nas simulações BMJ_FER e BMJ_ZHAO, os valores da precipitação de grande escala tem maior influência do que a convectiva. Os membros KF_FER e KFMX_FER não apresentam influência da precipitação convectiva e apresenta uma fraca precipitação de grande escala.

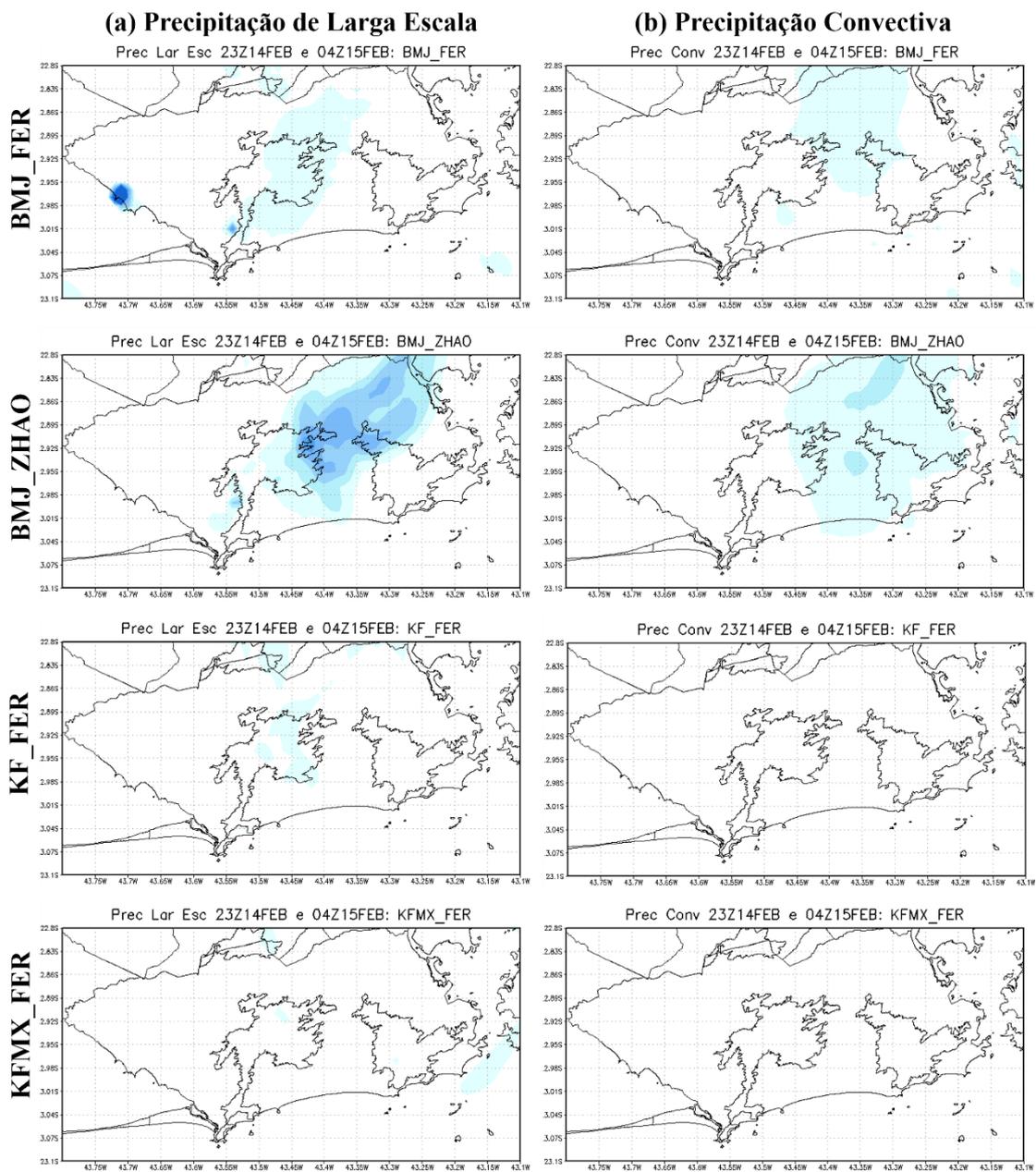


Figura 5.14 – (a) Precipitação de Grande Escala e (b) Precipitação Convectiva acumulada (mm/6h) entre 23 UTC do dia 14/02/2018 e 04 UTC do dia 15/02/2018.

5.3.2 Índices de Instabilidade

Nesta seção, são apresentados os resultados das 4 simulações (BMJ_FER, BMJ_ZHAO, KF_FER e KFMX_FER) realizadas pelo modelo Eta a fim de demonstrar a importância da utilização de índices de instabilidade na previsão de chuvas intensas.

5.3.2.1 Índice K

O índice K (Figura 5.15) apresentou valores significativos nas 4 simulações realizadas pelo modelo. As simulações BMJ_FER e BMJ_ZHAO demonstram o crescimento do índice K até o horário do evento no MRJ, conforme verificado nos dados observados. No dia 14 de fevereiro às 12 UTC (Figura 5.15a) são observados nas simulações BMJ_FER e BMJ_ZHAO valores do índice K de acima de 30°C na porção oeste do MRJ. As simulações KF_FER e KFMX_FER apresentam valores significativos em quase todo MRJ. Às 15 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.15b), as simulações com parametrização convectiva de BMJ apresentam uma diminuição no índice K, enquanto nas parametrizações convectivas de KF apresenta um aumento da área com valores significativos do índice, sendo os maiores valores encontrados na Zona Oeste do MRJ, com valores entre 35 e 40°C. A partir das 18 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.15c), observa-se um aumento no índice K a norte do MRJ nos membros BMJ_FER e BMJ_ZHAO com valores significativos variando entre 30 a 40°C. Para os membros convectivos KF, às 18 UTC, observa-se uma diminuição nos valores de K no norte do MRJ, com valores variando entre 20°C e 30°C, e os maiores valores, acima de 35°C, concentrados na Zona Sul do MRJ. Às 21 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.15d) se verifica valores significativos (variando entre 30 a 40°C) em todo o MRJ nos membros BMJ. Para o membro KF_FER, verifica-se uma diminuição do índice K, principalmente na Zona Oeste do MRJ, a oeste do maciço de Pedra Branca. No membro KFMX_FER os valores do índice K permanecem entre 30 a 40°C. Às 00 UTC do dia 15 de fevereiro (Figura 5.15e), horário da ocorrência do ECI, nota-se em todo MRJ valores elevados (acima de 30°C) do índice K. Os membros convectivos BMJ apresentam comportamento semelhante, entretanto, no BMJ_ZHAO, verifica-se uma maior área de atuação de valores acima de 35°C, compreendendo a área entre os maciços da Pedra Branca e Tijuca e zona norte do MRJ. Nota-se, neste horário, que os membros KF_FER e KFMX_FER apresentavam valores entre 30 a 40°C, na maior parte do MRJ.

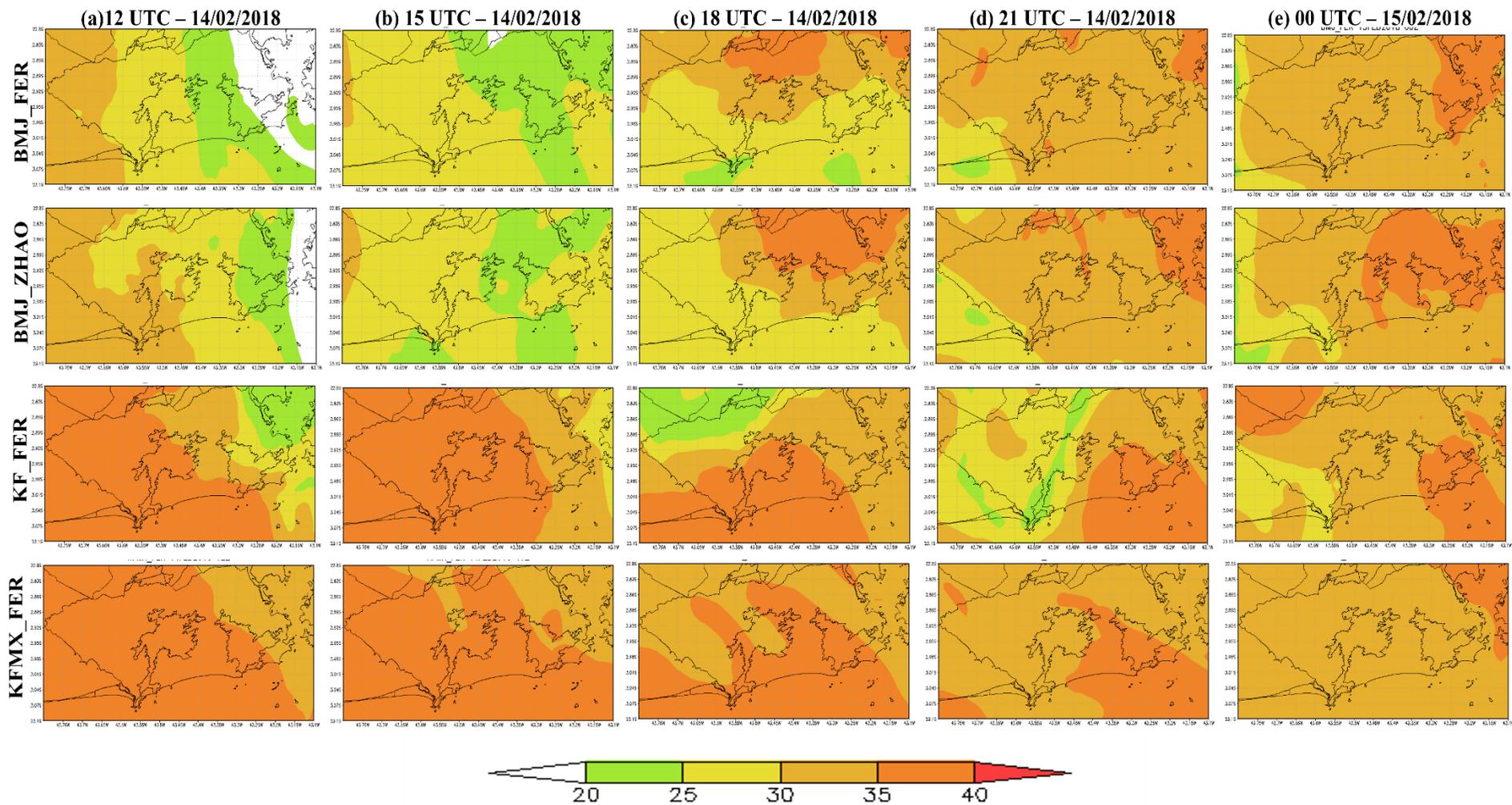


Figura 5.15 – Índice K (°C): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC, (c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC.

5.3.2.2 Índice “Total Totals” – TT

Os resultados das simulações do modelo Eta com índice TT são apresentados na Figura 5.16. No dia 14 de fevereiro, verifica-se a partir das 12 UTC (Figura 5.16a), que todas as simulações apresentam valores significativos (acima de 40°C) do índice TT. Nas simulações com parametrização convectiva BMJ, destaca-se na BMJ_ZHAO, um centro com valores mais significativos de índice TT (entre 42 e 46 °C) entre o maciço da Pedra Branca e Gericinó. As simulações com parametrização convectiva KF demonstram valores acima de 42°C em todo MRJ, destacando-se o membro KFMX_FER com valores entre 44 e 46°C sobre o maciço da Pedra Branca. A partir das 15 UTC (Figura 5.16b), verifica-se um aumento do índice TT em todos os membros, sendo os membros BMJ_FER e BMJ_ZHAO com valores mais significativos a leste do maciço da Tijuca e zona norte do MRJ. O membro KF_FER e KFMX_FER apresentam valores entre 44 e 46°C. Às 18 UTC se observa que, na maioria das simulações (exceto KF_FER), os máximos valores do índice TT estavam localizados entre o maciço da Pedra Branca e Tijuca. Às 21 UTC (Figura 5.16d) se nota uma diminuição do índice TT nos membros com parametrização convectiva BMJ e a permanência de valores mais significativos entres os maciços da Tijuca e Pedra Branca, estendendo-se para zona norte do MRJ. Às 00 UTC do dia 15 de fevereiro (Figura 5.16e) é observada uma diminuição do índice TT dos membros BMJ_FER, KF_FER e KFMX_FER, entretanto, pode-se destacar o membro BMJ_ZHAO que apresenta um aumento pontual do índice TT entre os maciços da Tijuca e Pedra Branca, região onde foram observados os maiores acumulados de precipitação durante o ECI.

Durante o período da simulação, nota-se que o membro BMJ_ZHAO apresenta melhor comportamento em relação aos outros membros devido à permanência de valores mais significativos sobre o local de maior acumulado de precipitação durante o ECI.

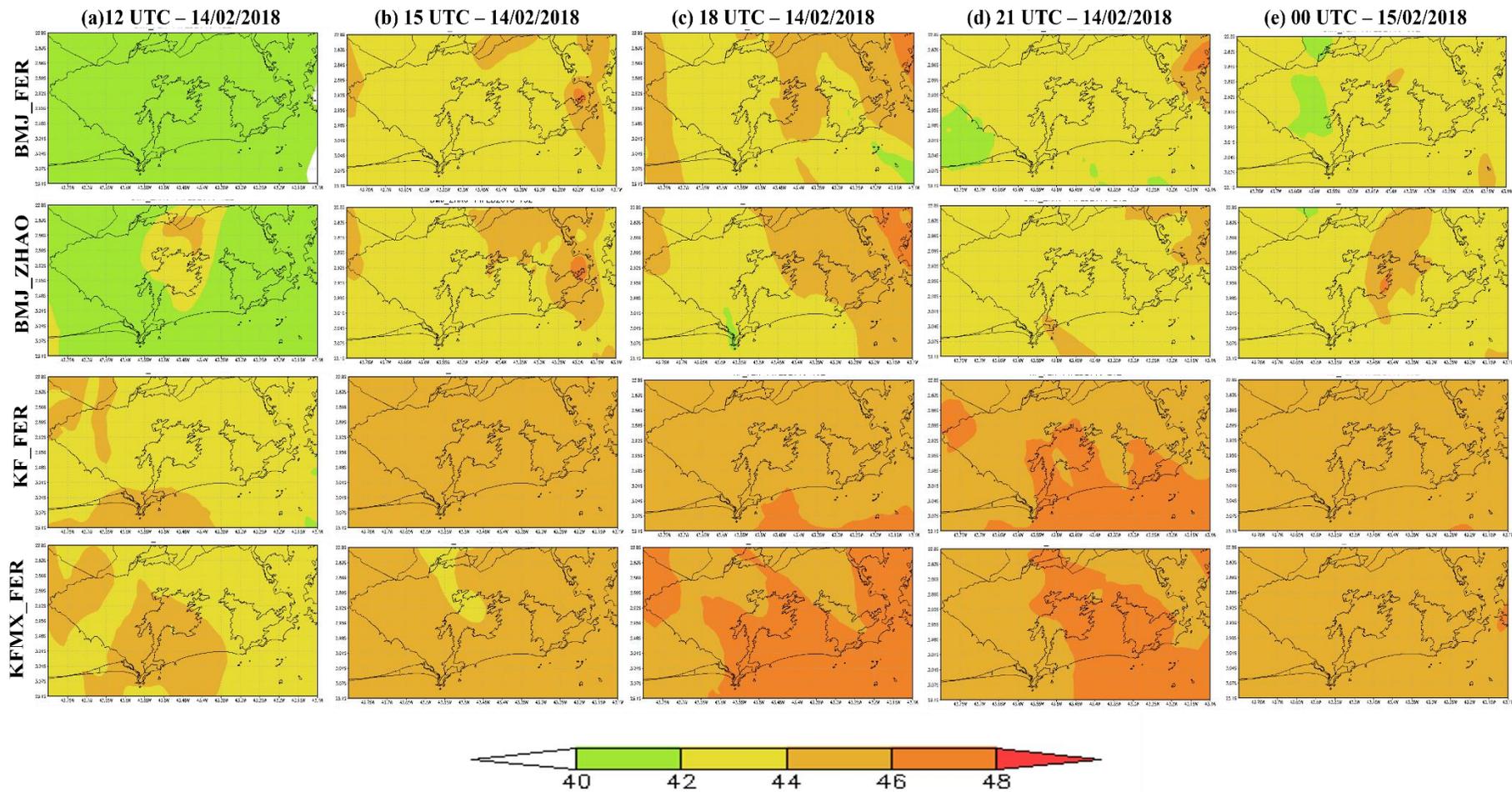


Figura 5.16 – Índice TT (°C): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC, (c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC.

5.3.2.3 Índice TTK

Os resultados das simulações do modelo Eta para o índice TTK para o ECI são apresentados na Figura 5.17. No dia 14 de fevereiro a partir das 12 UTC (Figura 5.17a), observa-se altos valores do índice TTK a nordeste do MRJ nos membros BMJ_FER (valores acima de 24°C), BMJ_ZHAO (valores acima de 22°C) e KF_FER (valores acima de 18°C). Às 15 UTC (Figura 5.17b) se observa uma diminuição do TTK, porém o índice se mantém significativo, com valores acima de 18°C no MRJ. Observa-se que os maiores valores de TTK se apresentaram nos membros com parametrização convectiva BMJ localizados entre o maciço de Gericinó e Pedra Branca. A partir das 18 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.15c), os valores significativos de TTK nos membros BMJ_FER e BMJ_ZHAO se encontram sobre o sul do MRJ, e no membro KF_FER, localizam-se a noroeste do município. Às 21 UTC (Figura 5.17d) são observados valores significativos a oeste do MRJ, com destaque para o membro KF_FER, com valores significativos de TTK variando entre 18°C a 24°C. Entre o Maciço da Pedra Branca e Tijuca, observa-se neste mesmo horário, valores de TT (acima de 48°C – Figura 5.16d) significativos, demonstrando muita instabilidade na região e uma camada seca (TTK acima de 24°C). Às 00 UTC do dia 15 de fevereiro (Figura 5.17e), nota-se que os membros BMJ_FER, BMJ_ZHAO e KF_FER apresentaram valores significativos a sudoeste do MRJ, variando entre 16 a 20°C. Vale ressaltar que, mesmo o membro KFMX_FER apresentando valores baixos de TTK, encontram-se valores de TT e K altos.

Pereira (2015) utilizou o índice TTK para facilitar a identificação de ambientes com grande instabilidade termodinâmica e presença de ar seco em níveis médios, situações tipicamente conducentes a tempestades com fortes ventanias. Entretanto, o autor ressalta que o índice deve ser utilizado com cautela, tendo em vista que um alto valor de TTK não necessariamente significa que TT também está suficientemente alto (acima dos limiares para tempestades).

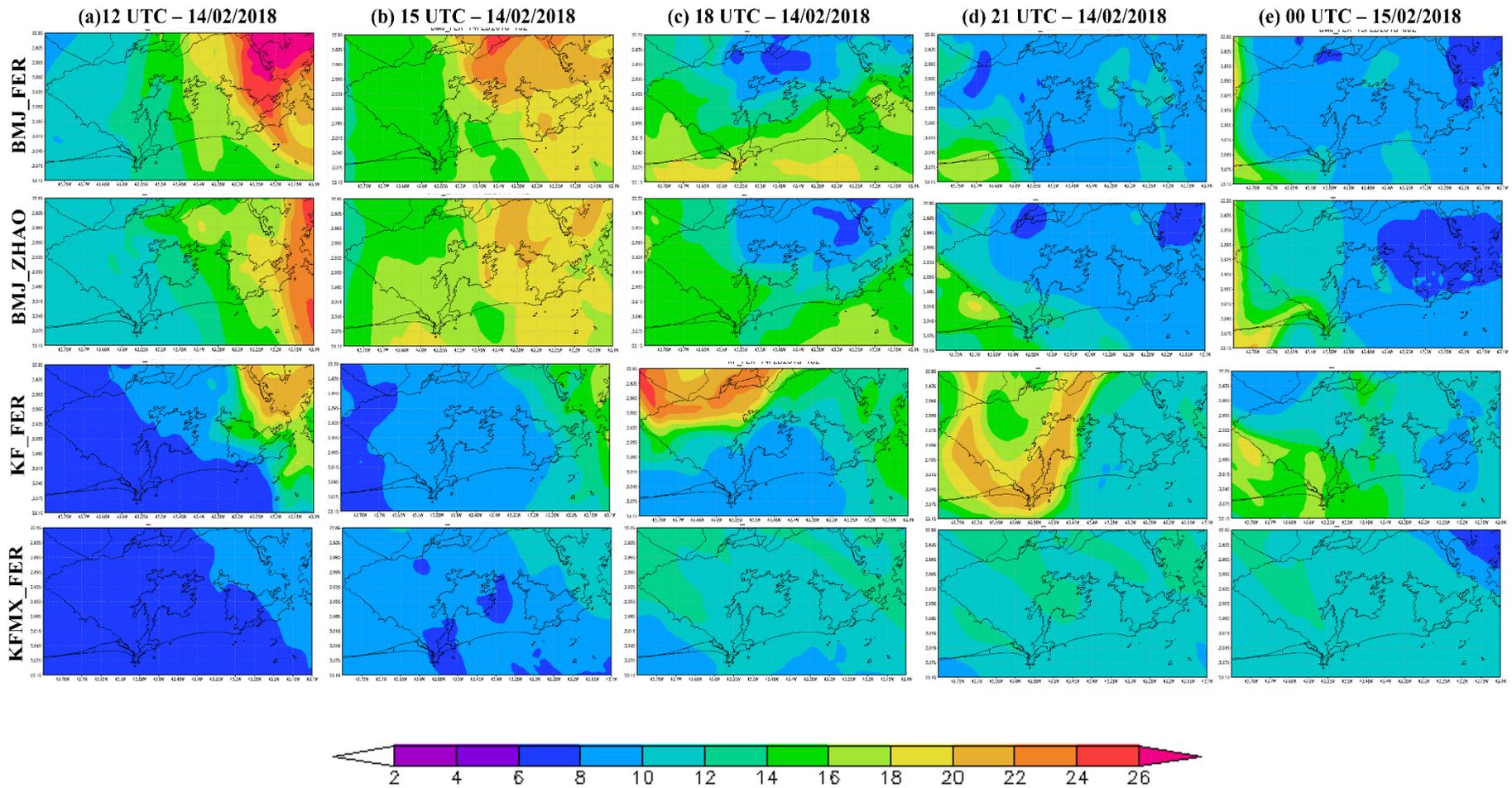


Figura 5.17 – Índice TTK (°C): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC, (c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC. .

A análise conjunta dos índices TT e K (índice TTK) é de grande utilidade para indicar ambientes propícios a fortes ventanias (Pereira 2015; Franco, 2017). Na Figura 5.18 são plotadas as séries temporais dos ventos e rajadas observados nos aeródromos de Santa Cruz (SBSC), Santos Dumont (SBRJ) e Galeão (SBGL) e os índices K, TT e TTK simulados pelo modelo Eta nas caixas de grade correspondentes a esses aeródromos. O retângulo vermelho destaca o período (00 até 05 UTC) da ocorrência do ECI.

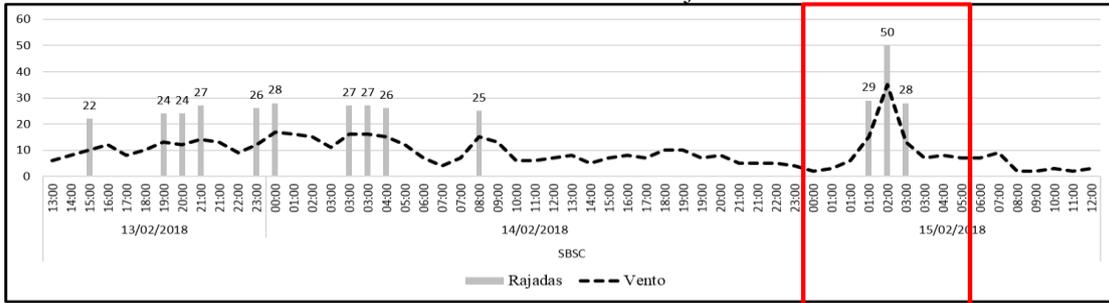
Na figura 5.16a, a partir das 12 UTC, são observados ventos de até 10 nós (18,5 km/h) e a partir das 00 UTC do dia 15 de fevereiro ocorre um aumento da intensidade do vento, sendo observados ventos de até 35 nós (64,8 km/h) e rajadas de até 50 nós (92,6 km/h). Em relação aos índices termodinâmicos, nota-se que entre 17 UTC e 22 UTC do dia 14 de fevereiro, anterior as observações de ventos intensos, as simulações BMJ_FER, BMJ_ZHAO e KF_FER simulam uma diminuição brusca do índice K e um aumento no índice TTK. Na figura 5.16b são observados no SBRJ ventos variando entre 5 e 10 nós (9,26 a 18,52 km/h) durante o dia 14 de fevereiro. a partir de 05 UTC do dia 14 de fevereiro, observa-se um aumento mais lento do índice TTK, com ventos de até 20 nós (37,4 km/h) e rajadas de até 29 nós (53,7 km/h). No SBGL (figura 5.16c), verifica-se que os índices apresentam o mesmo comportamento dos resultados encontrados no SBRJ.

Nota-se que a variação no valor de TTK apresentada pelas simulações do modelo Eta, neste trabalho, simularam um aumento significativo do índice K e uma queda brusca do índice K algumas horas depois da ocorrência de ventos fortes na região de estudo.

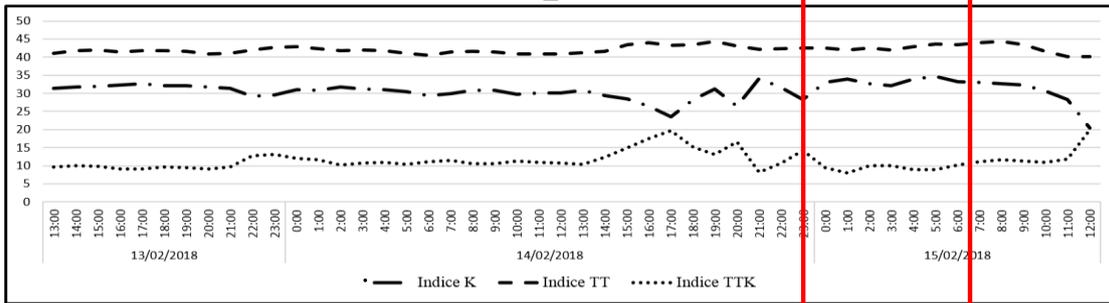
As simulações BMJ_FER, BMJ_ZHAO e KF_FER apresentaram um aumento e diminuição do índice K e um rápido aumento, em curto intervalo de tempo, do índice TTK em todos os pontos dos aeródromos, evidenciando que a utilização do índice TTK se apresenta como uma boa ferramenta para prevenção e indicação de possíveis áreas propícias a eventos de vento severo.

(a) SBSC

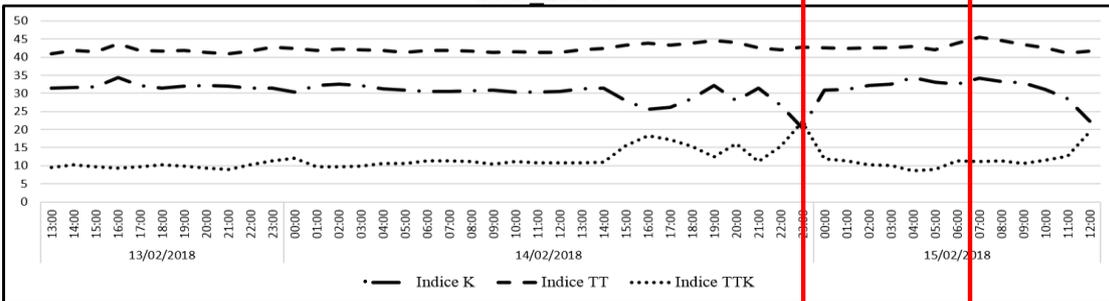
Intensidade do Vento e Rajadas



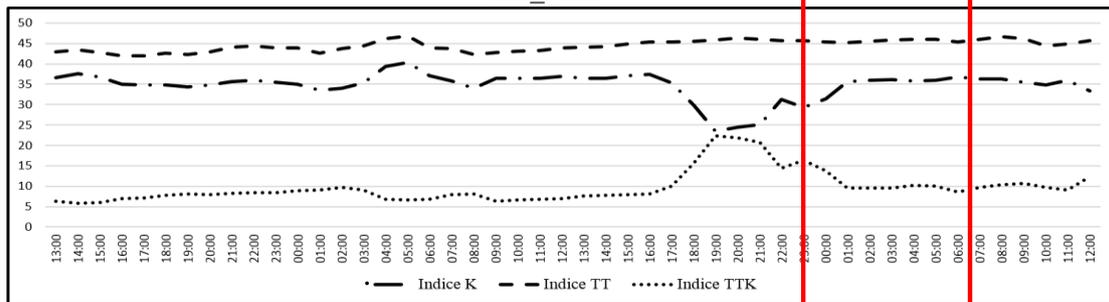
BMJ_FER



BMJ_ZHAO



KF_FER



KFMX_FER

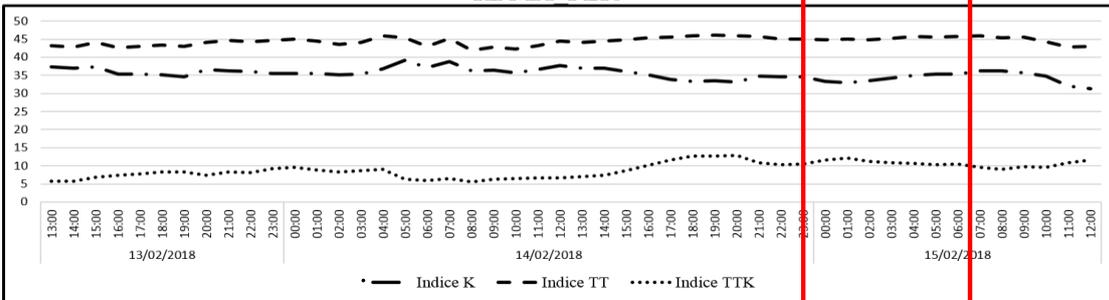
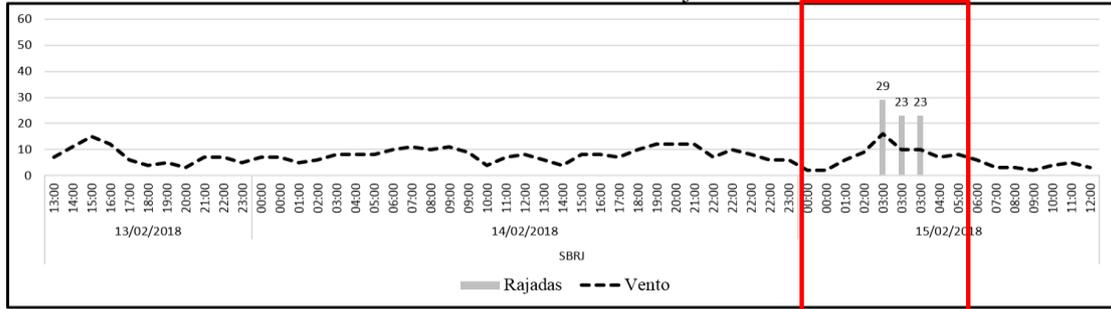


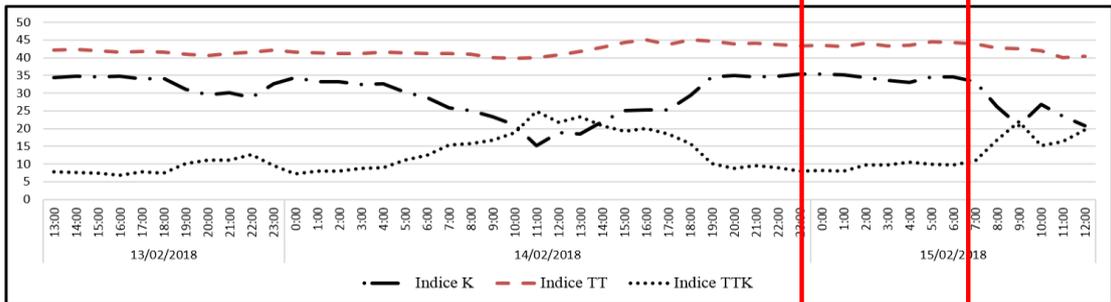
Figura 5.18 – Série temporal da intensidade do vento e rajadas (nós), Índice K (°C), Índice TT (°C), e Índice TTK (°C) nos aeródromos do MRJ: (a) SBSC, (b) SBRJ e (c) SBGL. O retângulo vermelho destaca o horário da ocorrência do ECI.

(b) SBRJ

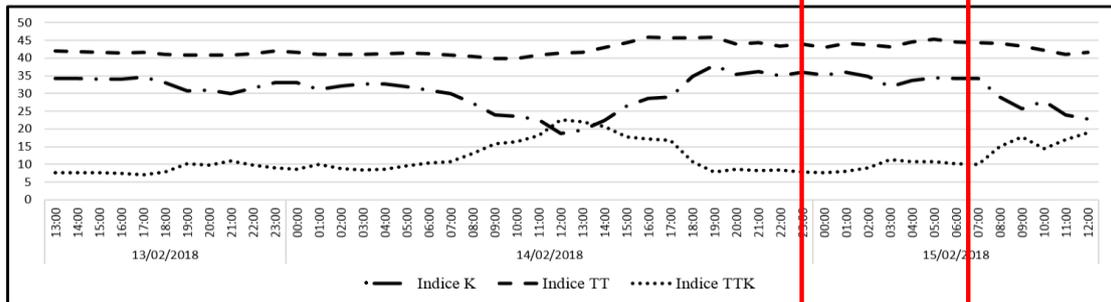
Intensidade do Vento e Rajadas



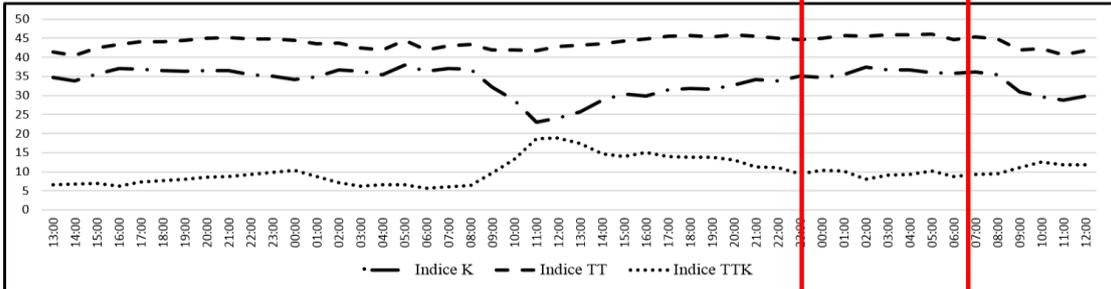
BMJ_FER



BMJ_ZHAO



KF_FER



KFMX_FER

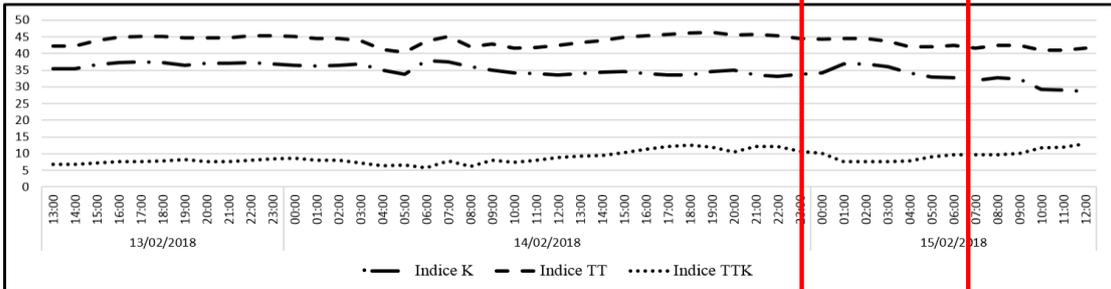
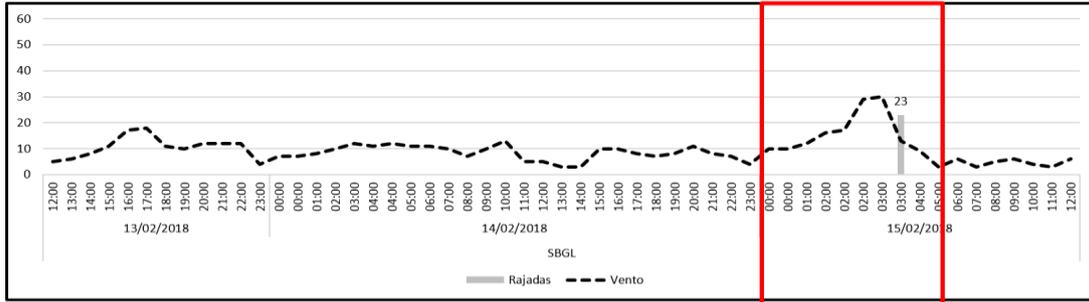


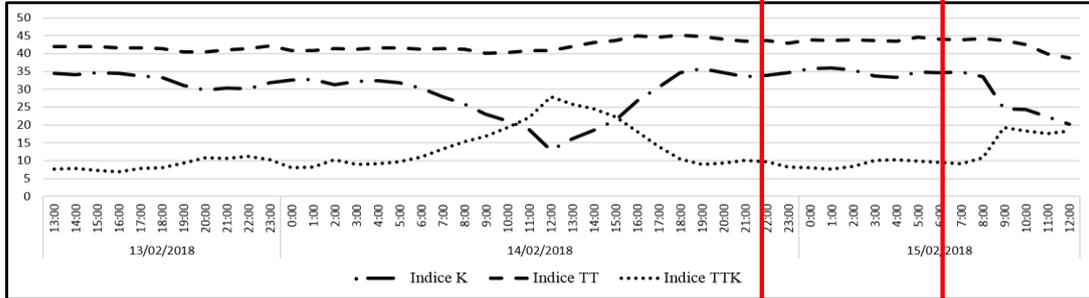
Figura 5.16 – Continuação ...

(c) SBGL

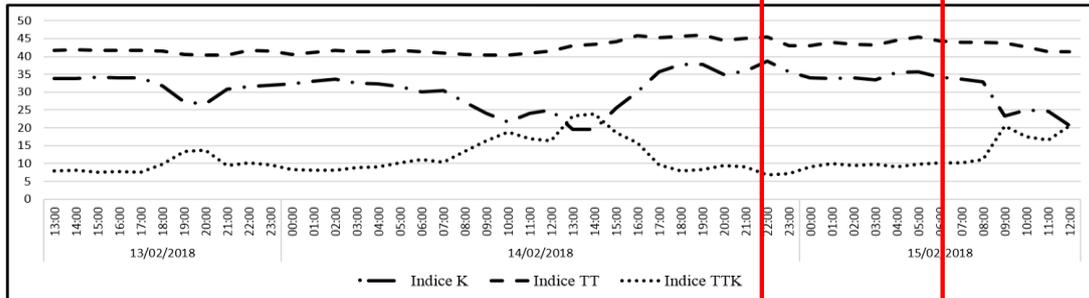
Intensidade do Vento e Rajadas



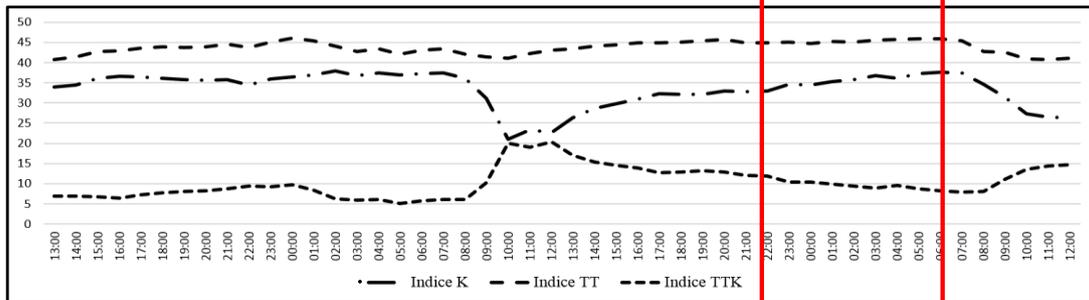
BMJ_FER



BMJ_ZHAO



KF_FER



KFMX_FER

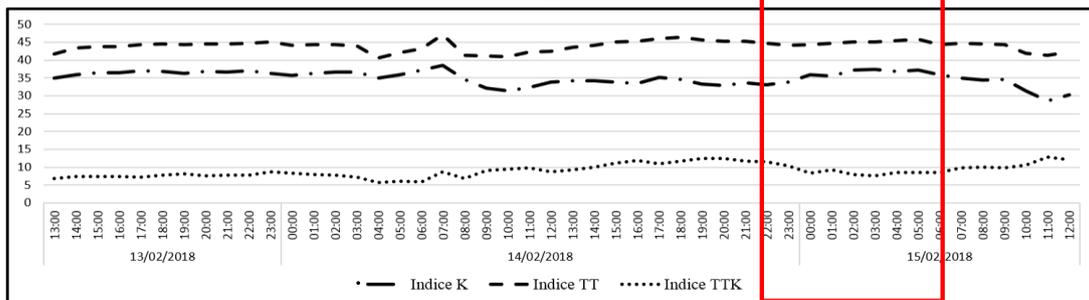


Figura 5.16 – Final.

5.3.2.4 Energia Potencial Convectiva Disponível – CAPE

A Figura 5.19 apresenta os resultados do campo da CAPE para cada uma das simulações realizadas com o Modelo Eta. No dia 14 de fevereiro às 12 UTC (Figura 5.19a), os membros BMJ_FER e BMJ_ZHAO apresentam valores mais significativos (acima de 1000 J/Kg) a oeste do maciço da Pedra Branca. Os membros KF_FER e KFMX_FER apresentaram valores significativos de CAPE em quase todo o MRJ, com os valores mais significativos (acima de 1900 J/Kg) na área entre os três maciços. Às 15 UTC (Figura 5.19b) se verifica um aumento da CAPE nos membros com parametrizações convectiva BMJ, observando valores mais significativos (acima de 1800 J/Kg) a oeste do maciço da Pedra Branca (BMJ_FER e BMJ_ZHAO) e entre os maciços da Tijuca e Pedra Branca (BMJ_ZHAO). Observa-se nos membros com parametrização convectiva KF (acima de 1900 J/Kg) as áreas significativas concentradas junto as áreas litorâneas e entre os maciços da Pedra Branca e Tijuca. Às 18 UTC (Figura 5.19c) se observa as áreas significativas dos membros BMJ_FER e BMJ_ZHAO (acima de 2000 J/Kg) concentradas ao sudeste do MRJ e junto aos maciços da Tijuca e Pedra Branca. Nos membros KF_FER e KFMX_FER se verifica uma leve diminuição dos valores de CAPE, apresentando valores acima de 1900 J/Kg. A partir das 21 UTC (Figura 5.19d) se observa uma forte diminuição nos valores de CAPE e as áreas significativas se concentraram no sudeste do MRJ em todos os membros simulados. A partir das 00 UTC do dia 15 de fevereiro (Figura 5.19e) são observados os valores mais significativos na região entre maciço da Tijuca e Pedra Branca no MRJ. Os membros com parametrização convectiva BMJ apresentam valores entre 1400 e 1900 J/Kg e os membros com parametrização convectiva KF apresentam valores entre 1100 e 1400 J/Kg.

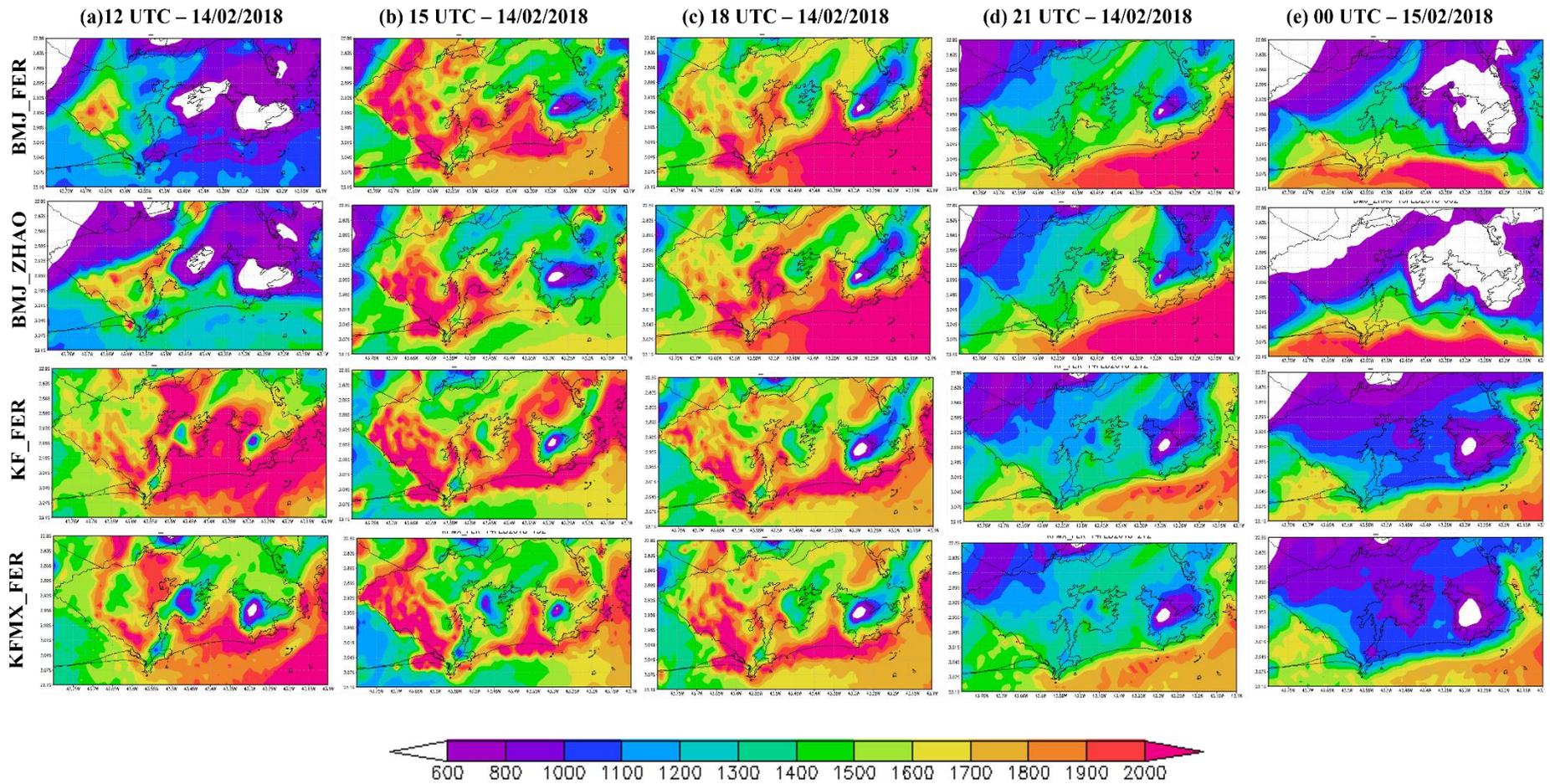


Figura 5.19 – Energia Potencial Convectiva Disponível – CAPE (J/Kg): (a) dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) dia 14/02/2018 às 15 UTC, (c) dia 15/02/2018 às 18 UTC, (d) dia 14/02/2018 às 21 UTC e (e) dia 15/02/2018 às 00 UTC.

5.3.2.5 Índice de Energia – IE

Para verificar e caracterizar o grau de instabilidade convectiva da atmosfera, é utilizado o Índice de Energia (Figura 5.20). Nota-se que a partir das 12 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.18a), as simulações demonstram a presença de instabilidade convectiva no MRJ, com valores mais significativos nas simulações BMJ_ZHAO (entre -10 e -16×10^{-3} J/Kg), KFMX_FER (entre -10 e -14×10^{-3} J/Kg) e BMJ_FER (entre -6 e -10×10^{-3} J/Kg), sendo observados esses valores mais significativos na região entre os maciços da Pedra Branca e Gericinó, e a simulação KF_FER (entre -4 e -10×10^{-3} J/Kg), cujo os valores estão concentrados mais a norte do município. A partir das 15 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.18b) se verifica uma diminuição no valor índice na região a leste do maciço da Pedra Branca e Gericinó, sendo observado nas simulações convectivas com o membro BMJ os valores significativos a nordeste do maciço da Tijuca, com valores de até -18×10^{-3} J/Kg. As simulações com membro convectivo KF, os valores significativos são observados a norte do maciço da Tijuca e maciço da Pedra Branca, sendo verificados valores de até -14×10^{-3} J/Kg. A partir das 18 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.18c), verifica-se um aumento dos valores do índice de energia em todas as simulações, significando uma diminuição nos locais que possuam instabilidade. Nota-se que nestas simulações, os maiores valores do índice se encontram na região central e nordeste do MRJ. Às 21 UTC do dia 14 de fevereiro (Figura 5.18d) se observa que os valores significativos do índice de energia nos membros com parametrização convectiva BMJ e o membro KFMX_FER são encontrados na Zona Norte e Centro do MRJ e os membro KF_FER apresenta os valores significativos em todo município. No horário das 00 UTC do dia 15 de fevereiro (Figura 5.18e) não são verificados valores significativos nas simulações com parametrização convectiva BMJ, entretanto, os membros com parametrização convectiva KF simulam os valores significativos entre os maciços da Tijuca e Pedra Branca.

Pereira (2015) encontrou em seus estudos que valores de índice de energia abaixo de -5×10^{-3} J/Kg estão relacionados à potencial produção de ventos severos quando ocorrência de tempestades convectiva. Em comparação ao resultado encontrado por Pereira (2015), nota-se que nesse estudo todos os horários das simulações com parametrização convectiva KF apresentaram valores abaixo deste limiar no MRJ. As simulações com parametrização convectiva BMJ apresentam uma diminuição desse índice próximo ao horário do evento (às 00 UTC do dia 15 de fevereiro).

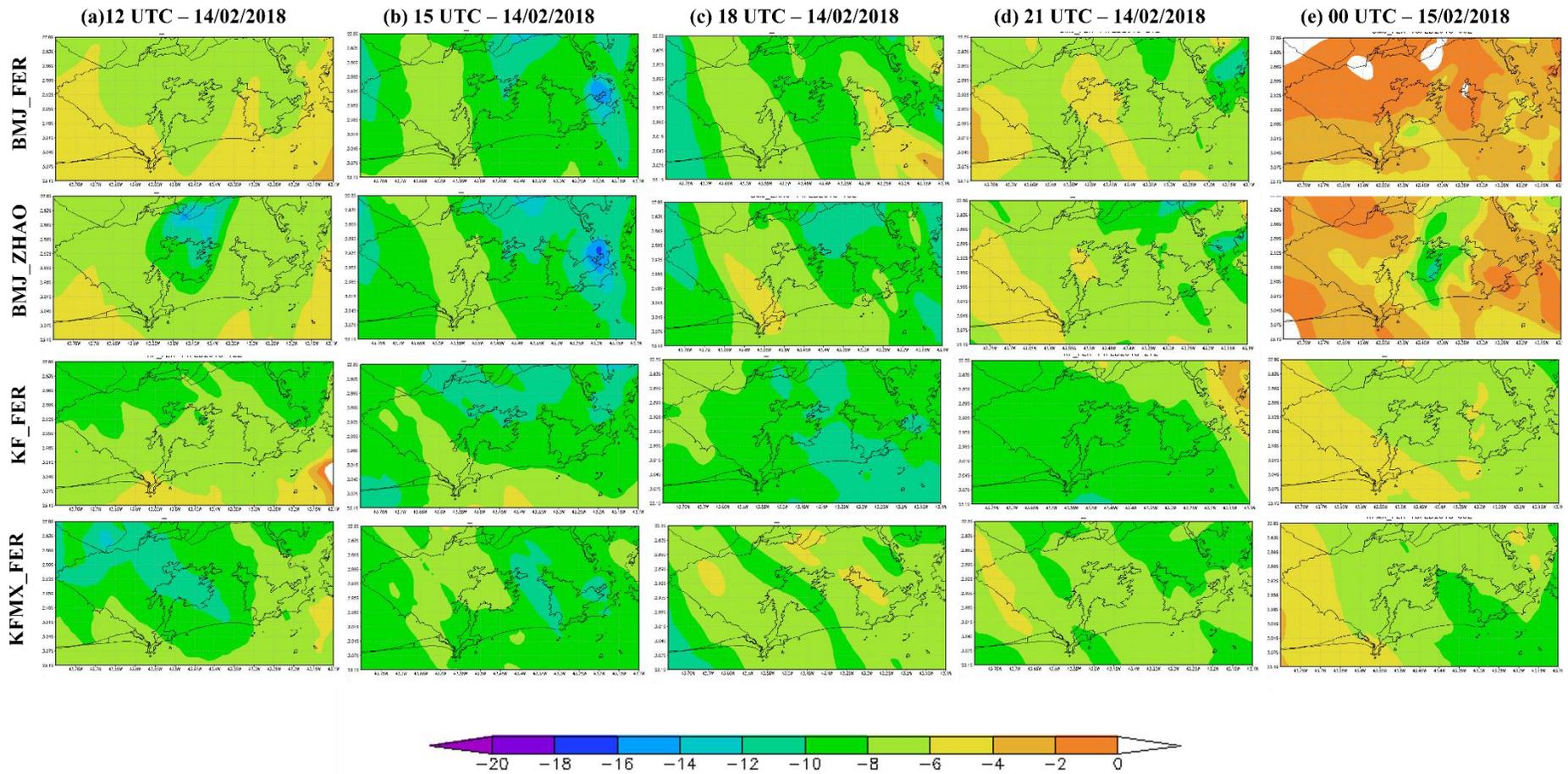


Figura 5.20 - Índice de Energia – IE (10^{-3} J/kg): (a) do dia 14/02/2018 às 12 UTC, (b) do dia 14/02/2018 às 18 UTC e (c) do dia 15/02/2018 às 00 UTC.

5.4 Considerações sobre o ECI de 15 de fevereiro de 2018

A partir das análises sinóticas desenvolvidas, nota-se que o ECI de 15/02/18 ocorreu após a passagem de um SF pelo ERJ. Um cavado estendendo-se por todos os níveis da troposfera deu suporte ao SF. Em superfície, verifica-se a presença de um centro de baixa pressão sobre o litoral do ERJ, promovendo a convergência de umidade na região. A partir da amplificação e inclinação zonal do cavado nos médios/altos níveis, observa-se o aparecimento de um vórtice ciclônico.

Comparando as simulações com a observação, nota-se que os membros que melhor simulam a precipitação são o BMJ_ZHAO e o BMJ_FER (ambos com parametrização convectiva), como já observado em Calado *et al.* (2018), sendo que o BMJ_ZHAO apresenta um melhor desempenho. Os demais membros que possuem parametrização convectiva KF simulam valores bem inferiores ao observado sobre o MRJ. Ao analisar a distribuição da precipitação em todo o domínio, verifica-se que todos os membros subestimam o valor da precipitação observada.

Em relação a importância da utilização de índices de instabilidade na previsão de chuvas intensas, nota-se que os índices termodinâmicos do modelo Eta apresentaram um bom desempenho para simular o comportamento desses indicadores para o evento de 15 de fevereiro de 2018. Valores significativos foram simulados para os índices de instabilidade (CAPE, K, TT, TTK e IE). A combinação dos índices K (valores máximos de 35°C) e de T (acima de 40°C), através do índice TTK, demonstra que a região de estudo apresentava um alto potencial para ocorrência de sistemas convectivos e ventos intensos, principalmente com o membro BMJ_ZHAO. O CAPE e o índice de energia também apresentaram valores significativos em todo o período simulado em todos os membros.

6 Conclusões

Neste trabalho elabora-se um estudo de caso de um ECI ocorrido no MRJ no dia 15/02/2018, durante o qual se observou o maior acumulado horário de precipitação (123,2 mm/h no Rio Centro) desde a criação do Sistema Alerta Rio, em 1997, além de fortes ventos e rajadas de até 90 km/h. Tal evento foi selecionado para estudo devido aos sérios transtornos observados na cidade, incluindo a morte de 6 pessoas, alagamentos, bolsões d'água, quedas de árvores, queda de ciclovias, entre outros. O objetivo principal foi identificar os principais mecanismos, em escala sinótica e em mesoescala, responsáveis pela ocorrência do evento. A expectativa é de que o melhor entendimento deste caso possa colaborar com a previsão de tempo deste tipo de evento. Ademais, foram elaboradas climatologias de 20 anos (1997-2016) de precipitação e de eventos de chuvas intensas (ECI) no MRJ. Realiza-se simulações com o modelo Eta com resolução de 1 km no intuito de determinar de forma mais apurada os aspectos de mesoescala envolvidos na evolução do evento.

Os resultados da climatologia de 20 anos de precipitação indicam a presença, durante as quatro estações do ano, de um núcleo máximo principal de precipitação localizado junto ao maciço da Tijuca, e dois outros máximos secundários: um no maciço da Pedra Branca e o outro junto ao maciço do Gericinó. A região de mínimos de precipitação se concentra na porção nordeste da cidade, ao longo de todo o ano, englobando principalmente as estações da Penha e do Irajá. Na análise do ciclo anual de precipitação e de dias úmidos para diversas estações localizadas em pontos diferentes da cidade, evidencia-se que a estação chuvosa se concentra entre os meses de outubro a março. Observam-se os máximos (mínimos) de precipitação e dias úmidos em janeiro (agosto). Os resultados também revelam uma distribuição desigual da precipitação ao longo do ano, ocorrendo em média para o MRJ cerca de 33% da precipitação anual em apenas 6,6 dias, quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95.

Em relação a metodologia proposta para identificação de ECI, verificou-se que esse método foi capaz de identificar a maior parte dos eventos ocorridos na cidade, com elevada taxa de acerto e baixo índice de alarme falso. Entretanto, é importante ressaltar que os eventos de chuva moderada, mesmo que ocorrendo durante vários dias consecutivos, provavelmente causaram transtornos na cidade e não serão detectados por esta metodologia.

Com relação aos resultados da climatologia de 20 anos de ECIs, nota-se que os máximos são coincidentes com as regiões mais chuvosas da cidade, localizadas próximos aos maciços, com valores de 8,0 dias/ano nas estações de Sumaré e do Mendanha. O mínimo é observado na Tijuca e Saúde (5,7 dias/ano). A respeito da frequência de ocorrência de ECIs em toda a cidade, pode-se esperar um total de 30 dias de ECIs por ano, com a maior parte deles (70%) ocorrendo no período chuvoso, entre dezembro e abril. Em relação à possível mudança na frequência de ocorrência de ECIs, verifica-se resultados surpreendentes em Piedade, com notável aumento de dias de ECIs, o que ocorre também para a maior parte dos postos pluviométricos, apesar do curto período de tempo analisado.

Com relação aos resultados do estudo do ECI ocorrido em 15/02/2018, observam-se em 3 postos pluviométricos (Rio Centro, Cidade de Deus e Estrada Grajaú/Jacarepaguá) acumulados de precipitação horária maiores do que suas médias climatológicas para todo o mês de fevereiro. O ECI ocorreu após a passagem de um SF, que atingiu o MRJ no dia 13/02/2018, provocando chuvas muito intensas na Zona Oeste da cidade. Após a passagem do SF, um centro de baixa pressão se formou sobre o litoral do ERJ. Um cavado nos médios e altos níveis da troposfera deu suporte ao centro de baixas pressões localizado em superfície. SCMs se desenvolveram sobre o MRJ, provocando chuvas muito intensas por um curto período de tempo (em torno de 2 horas) e rajadas acima de 90 km/h. Observam-se valores que configuram alta instabilidade sobre o Rio de Janeiro nas sondagens do Galeão, com o Índice K ultrapassando o valor de 41°C, o índice TT atingindo 48°C e a CAPE com valores superiores a 1000 J/Kg.

As simulações do ECI de 15 de fevereiro de 2018 utilizando o modelo Eta, revelam que o modelo subestimou muito os valores da precipitação. Contudo, foram simulados valores significativos para os índices de instabilidade (CAPE, K, TT, TTK e IE). A combinação dos índices K (valores máximos de 35°C) e de T (acima de 40°C), através do índice TTK, demonstra que a região de estudo apresentava um alto potencial para ocorrência de sistemas convectivos e ventos intensos, principalmente com o membro BMJ_ZHAO. Isso foi demonstrado ao se comparar o vento observado nos aeródromos com o índice TTK. Nessa comparação, identifica-se um aumento rápido do índice TTK em curto intervalo de tempo, indicando fortes ventanias e com um aumento mais lento do índice, foram observados ventos mais fracos sobre o MRJ. No IE, nota-se que 24 horas antes da ocorrência do ECI, são simulados valores significativos do índice indicando que

a área era propícia para ocorrência de ventos intensos. A CAPE apresentou valores significativos em todas as simulações, principalmente entre os maciços da Tijuca e Pedra Branca. Em relação ao Índice de Energia, verifica-se que todo MRJ apresentou valores abaixo de -5×10^{-3} J/Kg, sendo propício na região a ocorrência de eventos de ventos intensos devido a presença de sistemas convectivos na região. Portanto, a utilização da modelagem regional para previsão dos índices de instabilidade se destaca como uma ferramenta muito útil para apoiar a previsão de tempestades convectivas intensas como ocorrida neste ECI. Entretanto, essa ferramenta deve ser utilizada com muita cautela, pois requer melhorias para obter uma melhor indicação de ECI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOULAEV, S.; LENSKAIA, O. Evolução das Linhas de Convecção Severa. Parte 1. Classificação. Revista Brasileira de Meteorologia ,13(2), p. 15-36, 1998.

ANDRADE, K. M.; PINHEIRO, H. R.; DOLIF, G. N. Evento extremo de chuva no Rio de Janeiro: análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 37 Edição Especial SIC, 2015, p. 175 – 180, 2015.

BARCELLOS, P. C. Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: Probabilidade e Previsibilidade. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2009.

BLACK, T. L., The New NMC mesoscale Eta Model: description and forecast examples. Weather and forecasting. Vol.9, p.256-278, 1994.

BRASILIENSE, C. S.; DEREZYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; SILVA SANTOS, V. R.; CALADO, R. N. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in Southeast Brazil. Meteorological Applications. v. 25, p. 66-77. 2018.

CALADO, R. N.; DEREZYNSKI, C. P.; CHOU, S. C.; SUEIRO G.; MOURA J. D. O.; SANTOS V. R. S. Avaliação do Desempenho das Simulações por Conjunto do Modelo Eta-5km para o Caso de Chuva Intensa na Bacia do Rio Paraíba do Sul em Janeiro de 2000. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 33, n. 1, 83-96, 2018.

CARMO, L. F. R.; VASCONCELLOS, F. C.; MENEZES, W. F.; VASCONCELLOS, E. C. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. v. 42, n. 1, p. 769-782. 2019.

CARVALHO, P. R. B. Inclusão da Perturbação de Momentum no Esquema de Parametrização de Cumulus Kain-Fritsch e Impactos Sobre um Caso de Chuva Convectiva. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 2007.

CHAPPELL, C. F. Quasi-stationary convective events. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, Ray, P. S. Ed., American Meteorological Society, p. 289–310. 1986.

CHEN, F.; JANJIC, Z.; MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface layerparameterizations in the new land surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model, *Boundary Layer Meteorology*, v.85, p.391–421, 1997. DOI:10.1023/A:1000531001463.

CHOU, S. C. Modelo regional Eta. *Climanálise Especial comemorativa de 10 anos*, INPE, São José dos Campos, 1996.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. *Storm and Cloud Dynamics*. Academic Press. 883 p. 1989.

DARKOW, G. L. The Total Energy Environment of Severe Storms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 7, pp. 199-205, 1968.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 240, p. 24-38. 2009.

DERECZYNSKI, C. P.; CALADO, R. N.; BODSTEIN, A. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. v. 40, n. 2, p. 17-30. 2017.

DERECZYNSKI, C. P.; LUIZ SILVA, W.; MARENGO, J. A. Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. *American Journal of Climate Change*. 2(1): p. 25-33, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2013.21003>.

DOLIF, G. N. Previsão de Extremos de Chuva no Rio de Janeiro: Melhorias Utilizando o Conhecimento Adquirido com Eventos Anteriores. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos. 2012.

DOLIF, G. N.; NOBRE, C. Improving extreme precipitation forecasts in Rio de Janeiro, Brazil: are synoptic patterns efficient for distinguishing ordinary from heavy rainfall episodes? *Atmospheric Science Letters*, v. 13, p. 216-222. 2012.

FELS, S.B.; SCHWARZTKOPF, M.D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 32, p. 1475-1488, 1975.

FERRIER, B. S.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. *Conference on Numerical Weather Prediction*, 15, San Antonio, TX, American Meteorological Society, p. 280-283, 2002.

FRANCO, R. M. Análise das características atmosféricas associadas a eventos de “downbursts”: um estudo de caso para o rio de janeiro. *Monografia*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2017.

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

GERSHUNOV, A.; BARNETT, T. P. ENSO Influence on Intraseasonal Extreme Rainfall and Temperature Frequencies in the Contiguous United States: Observations and Model Results. *Journal of Climate*. v. 11, p. 1575-1586. 1998.

GOMES, J. L. e CHOU, S. C., Dependence of partitioning of model implicit and explicit precipitation on horizontal resolution. *Meteorology and atmospheric physics*. Vol. 106 p.01-18, 2010.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; KARL, T. R. Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: Trends in the twentieth century. *Bulletin of the American Meteorological Society*. v. 82, p. 219–246. 2001. DOI: 10.1175/JHM-D-11-039.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*. v. 18, p. 1326–1350. 2005. <https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; KARL, T. R. Changes in Intense Precipitation over the Central United States. *Journal of Hydrometeorology*. v. 13, p. 47-66. 2012. DOI: 10.1175/JHM-D-11-039.1

HANE, C.E. Extratropical squall lines and rainbands, *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. P. Ray. Ed. American Meteorological Society, p. 359-389. 1986.

HASSAN, V. V.; FRANÇA, J. R. A.; FIGUEIREDO, W. M.; PERES, L. F. Características Meteorológicas do Ambiente Sinótico e de Meseoescala Associadas ao Evento de Tornado na Cidade de Xanxerê – SC, em Abril de 2015. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. v. 40, n. 3, p. 131-138. 2017.

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

HOUZE, R. A. *Cloud Dynamics*. Academic Press, p.573,1993.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>, Acesso em 27/02/2018.

IPP – Instituto Pereira Passos. Acesso em 27/02/2018. <http://www.data.rio/pages/rio-em-sntese-2>.

JANJIC, Z. I. The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.

JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, v.5, n.3, p. 487-503, 2004.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. *The representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, *Meteorological Monographs*, American Meteorological Society, v. 24, n. 46, 1993.

KARL, T. R.; KNIGHT, R. W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA. *Bulletin of the American Meteorological Society*. v. 79, p. 231-241. 1998.

KIEFER, P. J. The thermodynamic properties of water and water vapor. *Monthly Weather Review*, 69, p. 329-331, 1941.

KONRAD, C. E. Synoptic-scale features associated with warm season heavy rainfall over the interior southeastern United States. *Weather and Forecasting*. v.12, n. 3, p.557–571. 1997.

KREITZBERG, C. W. The structure of occlusions as determined from serial ascents and vertically-directed radar. Air Force Cambridge Research Laboratories, Res. Rept. No. 64-26, p. 121, 1964.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, p.118-133, 1974.

LIMA, S.M.; CHOU, S.C.; SANTOS, I. A. Um estudo de Frontogênese com o Modelo Regional ETA. *Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia*, outubro de 1998, Brasília – DF. 1998.

LIMA, E. C. S. Análise de um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) observado na região norte da Argentina no dia 27 de novembro de 2002: Um estudo de caso utilizando o modelo RAMS. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas. 73 p. 2004.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brasil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 101, n. 1- 2, p. 121-135. 2010.

MCGINLEY, J. Nowcasting Mesoscale Phenomena (Chap. 28). *Mesoscale Meteorology and Forecasting* (P. RAY, ed.). American Meteorological Society. Boston. p. 657-688. 1986.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v.20, p.851-875, 1982. DOI:10.1029/RG020i004p00851.

MELLOR, G.L.; YAMADA, T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, p. 1791–1806, 1982.

MENEZES, W. F. Tempestades severas: Um modelo para latitudes subtropicais. Tese de Doutorado em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Atmosféricas - IAG/USP. São Paulo. 174 p. 1998.

MENEZES, W. F.; SILVA DIAS, M. A. F. Simulação numérica de um caso de tempestade severa em ambiente ciclônico em grande e mesoescala. *Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Campos do Jordão. v. 2, p. 1312-1326. 1996.

MENEZES, W. F.; SILVA DIAS, P. L. Um Estudo do Impacto das Opções Físicas do Modelo RAMS na Simulação Numérica do “Ciclone Catarina”. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Fortaleza-CE. 2004.

MENEZES, W. F.; SILVA DIAS, M. A. F. Simulação numérica das tempestades ocorridas no Estado de São Paulo em 14 de maio de 1994: o caso Ribeirão Preto. *Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1o. Seminário Brasileiro de Meteorologia de Mesoescala*. Brasília/DF. 1998.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Riv. Meteor. Aeronautica*. Vol.44 p.195-202, 1984.

MESINGER, F. JANJIC, Z.I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D. & DEAVEN, D.G. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Monthly Weather Review*, v.116, p.1493-1518, 1988.

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; LYRA, A.A.; BUSTAMANTE, J.F.; BASTOS, P.R.; LAZIC, L.; MORELLI, S.; RISTIC, I. An upgraded version of the Eta Model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v.116, n.3/4, p.63-79, 2012.

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

MOURA, C.R.W.; ESCOBAR, G.C.J.; ANDRADE, K.M. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na região metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.3, p. 267 - 280, 2013

MOURÃO, C. E. F. Estudo do Comportamento de Indicadores de Tempo Severo em Casos de Tempestades sobre o Rio de Janeiro utilizando o Modelo Rams. Monografia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

NASCIMENTO, E. L. Previsão De Tempestades Severas Utilizando-Se Parâmetros Convectivos E Modelos De Mesoescala: Uma Estratégia Operacional Adotável No Brasil? *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.1, 121-140, 2005.

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, v. 9, p.857-861, 1970.

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

POLIFKE DA SILVA, F.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; MENEZES, W. F.; ALMEIDA, V. A. Avaliação de Indicadores Atmosféricos Utilizando o Modelo Numérico WRF em Eventos de Chuva na Cidade do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. v. 38, n. 2, p. 81-90. 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2015_2_81_90

POLIFKE DA SILVA, F. Chuvas severas no Rio de Janeiro: Avaliação de indicadores dos processos físicos associados. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y.; CHUANG, H.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; MENDEZ, M. P.; VAN DEN DOOL, H.; ZHANG, Q.; WANG, W.; CHEN, M.; BECKER, E. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27, p. 2185-2208. 2014.

SALES, F. H.; PEREIRA FILHO, A. J. Comparações entre aspectos observacionais e simulação numérica de uma linha de instabilidade simétrica de longa duração sobre o Estado de São Paulo. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro. p. 1626-1634 (CDROM), 2000.

SELUCHI, M. E.; BEU, C. M. B.; ANDRADE, K. M. Características das frentes frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 18, p. 361-376. 2016.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic Patterns Associated with Landslide Events in the Serra do Mar, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 98, p. 67-77, 2009.

SILVA PAIVA, L. M.; MENEZES, W. F. Comparação entre 2 casos de linhas de instabilidade observados nos dias 25 e 31 de janeiro de 2000 no Rio de Janeiro. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro-RJ, 2000.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 135, p. 598-614. 2007.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A.R. *Meteorologia Básica e Aplicações*, Viçosa, Imprensa Universitária, UFV, 449 p. 1991.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. Characteristics of isolated convective storms. *Mesoscale Meteorology and Forecasting* edited by Peter S. Ray., American Meteorological Society, p. 331-353. 1986.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, Second Edition. International Geophysics Series, Elsevier, USA, v. 91, p. 262-265. 627 p. 2006.

XAVIER, M. C. A. Estudo dos padrões atmosféricos associados a tempestade de verão no Estado do Rio de Janeiro. Monografia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 53 p. 2002.

ZHAO, Q. Y., F. H. CARR, A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Monthly Weather Review*, v. 125, p.1931–1953, 1997.

Apêndice I – Totais Pluviométricos Médios Mensais/Anual

Nome da Estação	Latitude	Longitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Vidigal	-22,99	-43,23	158,3	84,4	130,2	116,9	103,4	80,8	90,2	57,9	98,4	101,4	134,0	139,8	1295,8
Urca	-22,96	-43,17	151,3	87,8	125,5	81,6	84,94	58,2	68,3	44,3	77,7	88,7	119,0	132,1	1034,5
Rocinha	-22,99	-43,25	182,7	91,8	154,6	143,5	126,9	112,0	138,6	85,4	151,4	146,2	185,4	175,3	1693,8
Tijuca	-22,93	-43,22	192,8	116,0	159,4	155,3	104,4	76,6	78,7	53,7	113,2	122,7	161,1	183,7	1517,4
Santa Teresa	-22,93	-43,20	164,8	100,3	135,7	113,9	95,3	65,8	66,0	46,8	103,0	105,3	145,8	164,8	1307,4
Copacabana	-22,99	-43,19	149,1	83,0	113,9	107,0	87,0	64,8	71,8	41,4	73,7	90,1	113,4	133,9	1129,1
Grajau	-22,92	-43,27	184,3	98,5	153,8	132,1	76,9	51,1	53,8	37,8	68,7	94,2	120,7	156,5	1228,3
Ilha do Governador	-22,82	-43,21	195,8	104,7	134,1	83,5	51,9	35,2	38,2	24,4	51,2	79,5	135,4	155,9	1089,9
Penha	-22,84	-43,28	160,7	91,9	103,8	80,8	45,6	29,4	32,7	19,1	41,5	60,7	103,4	142,1	911,7
Madureira	-22,87	-43,34	191,5	99,8	127,4	83,3	56,0	42,8	40,7	25,4	51,2	78,3	117,7	148,6	1062,6
Iraja	-22,83	-43,34	192,4	110,8	116,3	63,0	45,2	30,4	35,9	19,8	43,7	72,9	118,8	156,1	1005,3
Bangu	-22,88	-43,47	177,8	109,0	131,0	84,2	55,2	37,3	37,4	23,7	49,4	75,0	107,9	151,6	1039,5
Piedade	-22,89	-43,31	186,0	120,1	241,0	131,6	95,0	79,6	71,9	41,4	100,4	95,3	111,2	147,1	1420,7
Jacarepagua/Tanque	-22,91	-43,36	180,9	95,1	128,7	89,1	64,1	50,9	47,5	32,7	56,4	76,0	116,8	151,8	1090,0
Saúde	-22,90	-43,19	160,8	94,4	126,0	84,3	68,6	45,1	46,8	25,3	67,8	84,2	123,5	149,0	1075,6
Jardim Botânico	-22,97	-43,22	168,3	91,8	139,9	130,2	109,2	83,1	106,1	66,4	121,9	117,2	144,1	158,3	1436,4
Barra/Barrinha	-23,01	-43,30	155,2	103,0	166,5	95,8	99,3	83,8	81,3	42,3	79,5	54,0	192,2	108,7	1261,2
Jacarepagua/Cidade de Deus	-22,95	-43,36	162,5	90,3	124,9	91,2	73,0	58,4	53,5	38,8	62,8	81,3	110,0	137,6	1084,3
Barra/Riocentro	-22,98	-43,41	178,0	107,4	128,2	96,9	94,2	74,6	73,6	52,6	88,1	90,4	123,8	147,2	1255,0
Guaratiba	-23,05	-43,59	156,5	105,5	126,1	84,4	82,2	53,0	58,2	31,9	65,1	85,5	106,9	112,0	1067,2
Est. Grajau-Jacarepagua	-22,93	-43,32	229,3	83,8	174,0	104,8	81,6	79,6	62,6	35,2	69,2	75,1	113,4	155,3	1263,8
Santa Cruz	-22,91	-43,68	188,4	122,3	153,8	101,9	73,9	48,0	53,0	35,5	64,3	87,8	128,2	145,6	1202,5
Grande Meier	-22,89	-43,28	199,5	93,5	145,9	96,1	61,1	40,3	42,1	27,4	57,1	83,1	118,5	157,7	1122,1
Anchieta	-22,83	-43,40	205,1	119,9	142,6	83,7	53,4	36,2	39,0	22,3	50,9	81,4	132,1	171,2	1137,8

Apêndice I - Final

Nome da Estação	Latitude	Longitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Grota Funda	-23,01	-43,52	211,7	119,6	151,4	122,6	111,5	84,2	91,8	55,0	108,8	114,0	146,7	153,2	1470,3
Campo Grande	-22,90	-43,56	185,5	97,6	137,9	92,3	62,7	41,6	48,3	33,4	57,3	81,7	105,6	131,1	1075,0
Sepetiba	-22,97	-43,71	164,2	117,4	139,6	103,2	72,8	51,8	55,0	30,5	56,4	91,7	118,9	121,9	1123,2
Alto da Boa Vista	-22,97	-43,28	257,3	97,5	251,6	186,3	173,5	181,7	185,7	97,3	147,4	139,1	201,6	170,6	2089,6
Av. Brasil/Mendanha	-22,86	-43,54	238,2	91,4	145,4	125,5	55,8	58,6	44,1	23,1	52,9	64,9	122,7	130,2	1152,7
Recreio dos Bandeirantes	-23,01	-43,44	160,5	98,2	120,2	90,9	87,9	60,0	66,3	42,4	77,0	85,2	109,2	120,8	1118,6
Laranjeiras	-22,94	-43,19	163,0	86,3	144,9	127,3	107,2	72,6	85,9	51,6	109,7	105,9	154,4	164,1	1373,0
São Cristovão	-22,90	-43,22	147,7	80,3	127,6	106,2	62,0	45,8	42,0	21,8	51,6	74,6	116,9	129,2	1005,6
Tijuca/Muda	-22,93	-43,24	188,2	83,6	181,1	143,6	90,2	84,3	56,9	34,9	77,4	71,9	114,5	127,9	1254,5
Mendanha	-22,82	-43,52	208,9	147,6	160,3	106,0	88,7	53,6	89,2	66,2	124,3	137,5	170,6	236,2	1589,0
Itanhanga	-23,00	-43,30	185,5	95,6	160,2	132,3	123,5	92,8	122,9	72,2	144,4	153,6	167,8	185,4	1636,2
Sumare	-22,95	-43,24	242,1	136,1	192,3	193,6	168,6	133,0	178,2	135,4	297,6	265,7	289,3	313,7	2545,7
Gericino	-22,89	-43,58	193,8	114,0	127,1	94,6	67,2	35,1	52,3	40,5	61,4	106,3	135,8	166,8	1194,9
Média Mensal			184,3	101,9	146,6	109,7	85,4	65,2	70,4	44,2	85,8	97,8	136,1	154,9	1280,0
Desvio Padrão (mm/mês)			26,8	15,3	30,8	28,9	30,3	30,3	36,4	23,9	46,9	36,8	36,1	35,6	318,0

Apêndice II – Média Mensal dos dias Úmidos (precipitação \geq 1mm/dia)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Anchieta	12	8	9	7	7	5	5	4	7	8	11	11
Bangu	11	8	9	7	7	5	4	4	7	8	10	11
Campo Grande	11	8	9	7	7	5	6	4	7	8	10	11
Cidade de Deus	10	7	9	7	7	5	6	5	7	8	10	10
Copacabana	10	6	8	7	8	6	6	5	8	8	9	9
Gericinó	13	9	9	7	7	4	6	6	8	9	11	11
Grajau	11	7	9	7	8	5	6	5	8	9	11	10
Grande Meier	12	8	9	7	8	5	5	5	7	8	10	10
Grota Funda	11	8	9	8	8	6	7	5	9	10	11	10
Guaratiba	11	7	9	7	8	6	5	5	8	9	10	9
Ilha do Governador	12	7	9	6	6	4	4	4	7	8	10	10
Irajá	12	8	9	7	7	4	4	4	6	8	11	11
Itanhangá	11	7	9	7	9	6	7	7	9	11	11	11
Jardim Botânico	10	6	9	7	8	6	7	6	8	9	11	9
Laranjeiras	11	7	9	7	8	5	6	6	9	9	11	11
Madureira	11	7	9	6	7	5	5	4	6	8	11	11
Mendanha	15	11	11	7	8	6	8	7	10	12	13	14
Penha	12	7	9	7	7	4	4	4	6	7	10	10
Piedade	11	7	9	7	8	5	6	5	7	8	10	10
Recreio	10	7	8	7	8	6	6	5	8	9	10	9
Rio Centro	11	7	9	6	8	6	6	6	8	9	11	9
Rocinha	10	7	9	7	8	7	7	7	9	10	11	10
Santa Cruz	11	8	10	7	8	5	6	5	7	8	11	11
Santa Tereza	11	7	9	7	8	5	6	5	8	10	10	10

Apêndice II - Final

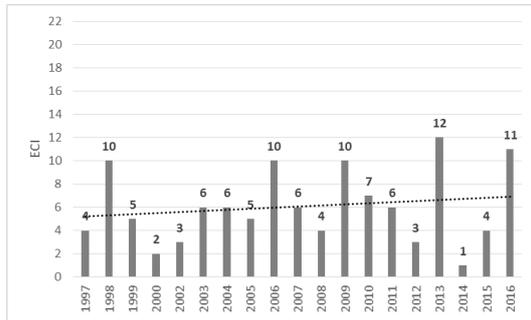
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Cristóvão	10	7	8	7	7	5	5	4	6	8	10	10
Saúde	11	7	9	6	7	4	5	4	7	8	10	10
Sepetiba	11	8	9	7	7	5	5	4	7	9	10	9
Sumaré	13	9	10	9	10	7	9	8	11	12	13	13
Tanque	11	7	9	7	7	5	6	5	7	8	11	10
Tijuca	12	7	9	8	9	6	6	6	9	10	11	10
Urca	11	6	8	6	8	5	6	5	8	8	10	9
Vidigal	10	6	9	7	8	6	7	6	8	9	10	9
Média Mensal	11	7	9	7	8	5	6	5	8	9	11	10
Desvio Padrão	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Apêndice III – Média Anual de ECI (dias/ano)

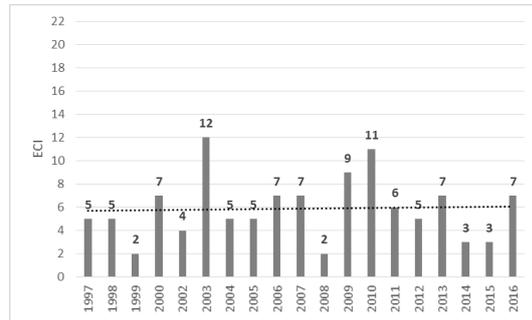
Postos Pluviométricos	Nº Anual de ECI
Anchieta	6,0
Bangu	6,0
Campo Grande	6,1
Cidade de Deus	6,0
Copacabana	5,8
Grajaú	6,2
Grande Meier	6,2
Grota Funda	6,7
Guaratiba	6,2
Ilha do Governador	5,7
Irajá	6,0
Jardim Botânico	6,3
Madureira	6,2
Mendanha	7,5
Penha	5,7
Piedade	6,0
Recreio	6,0
Rio Centro	6,4
Rocinha	6,6
Santa Cruz	6,3
Santa Tereza	6,1
Saúde	5,7
Sepetiba	6,2
Sumaré	7,9
Tanque	6,1
Tijuca/Muda	6,0
Tijuca	5,7
Urca	6,1
Vidigal	6,3

Apêndice IV – Séries temporais por estação dos totais anuais de ECI

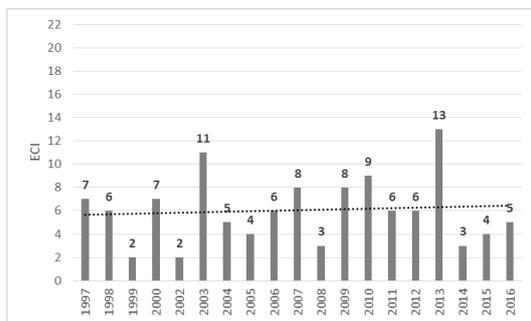
(a) Anchieta



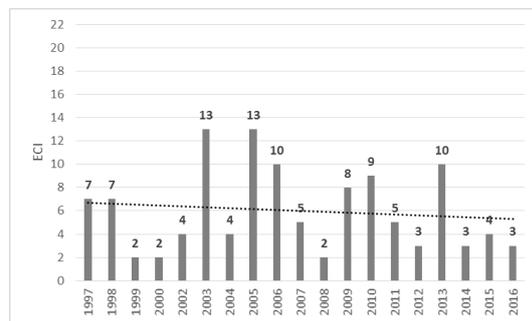
(b) Bangu



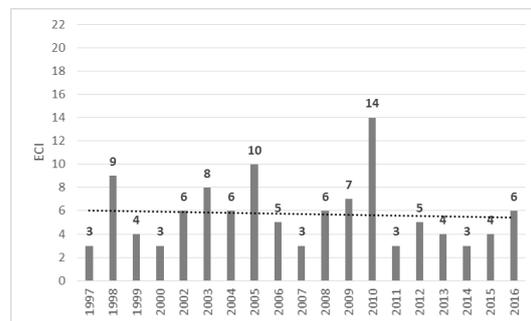
(c) Campo Grande



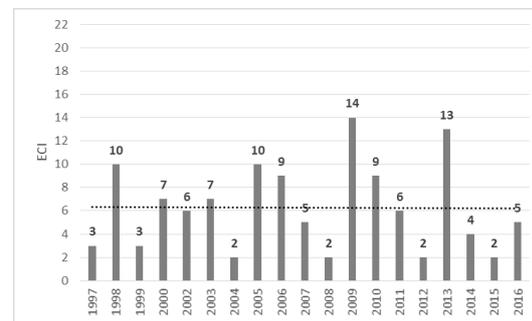
(d) Cidade de Deus



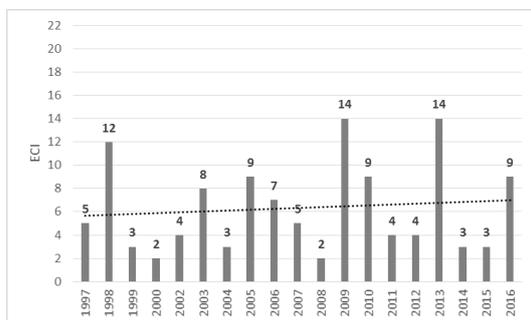
(e) Copacabana



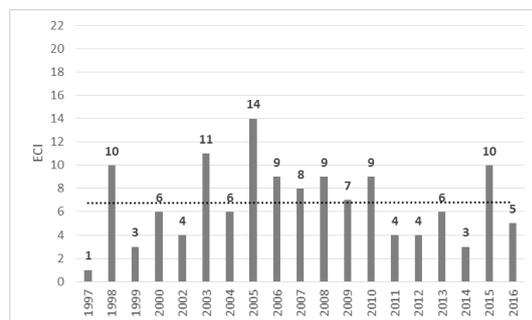
(f) Grajaú



(g) Grande Méier

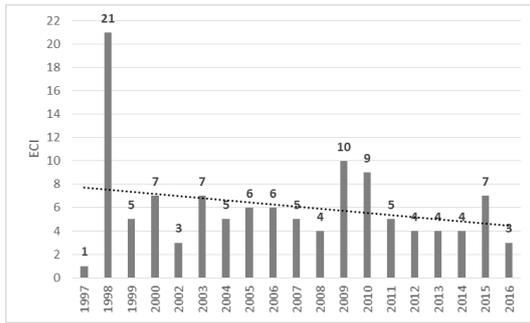


(h) Grota Funda

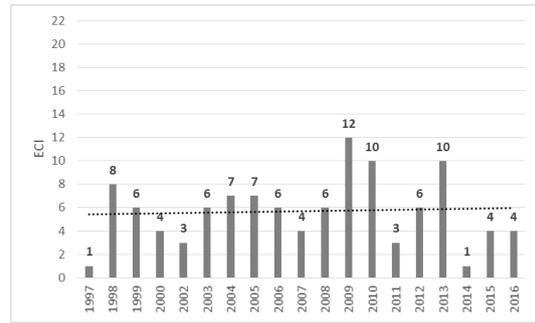


Apêndice IV – Continuação ...

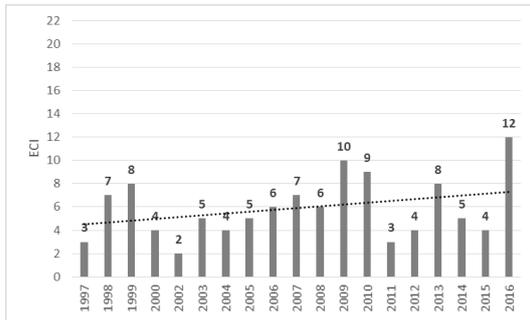
(i) Guaratiba



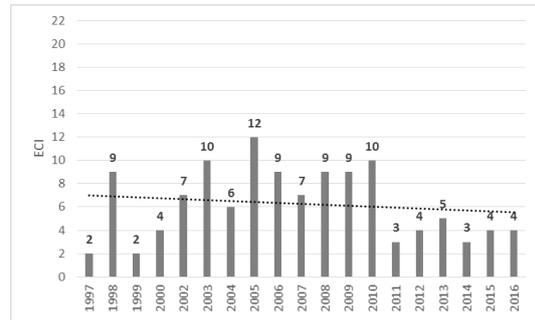
(j) Ilha do Governador



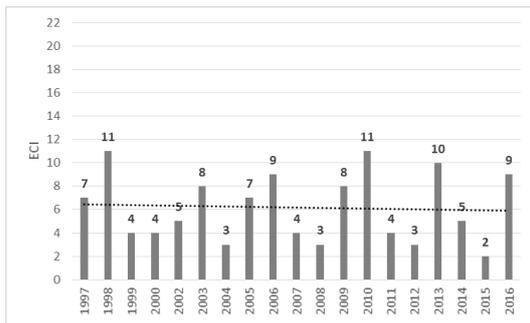
(k) Irajá



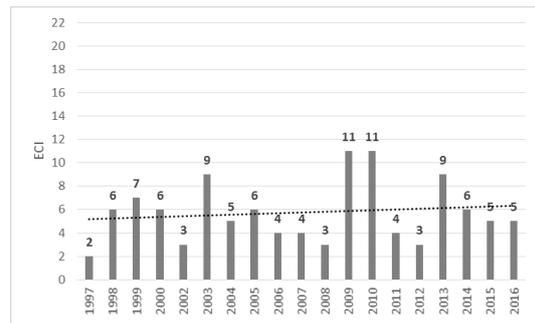
(l) Jardim Botânico



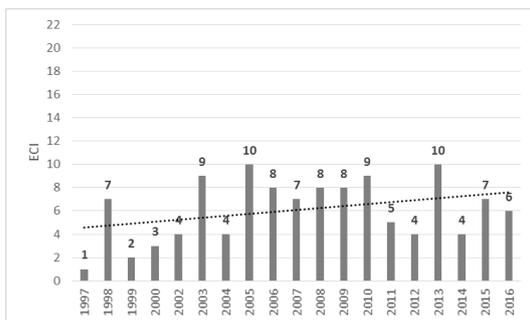
(m) Madureira



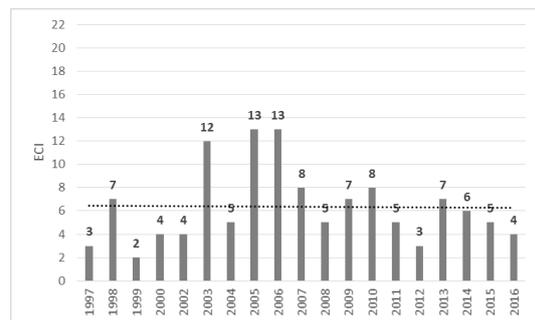
(n) Penha



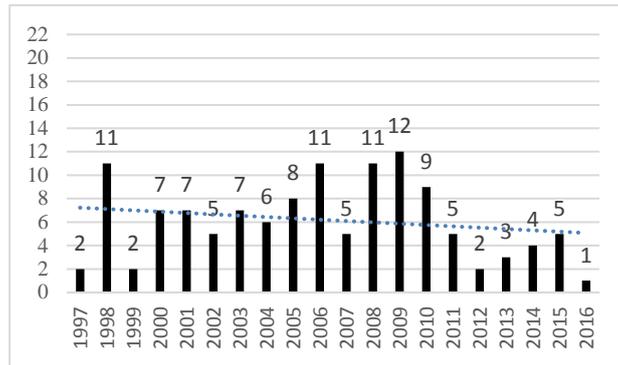
(o) Recreio



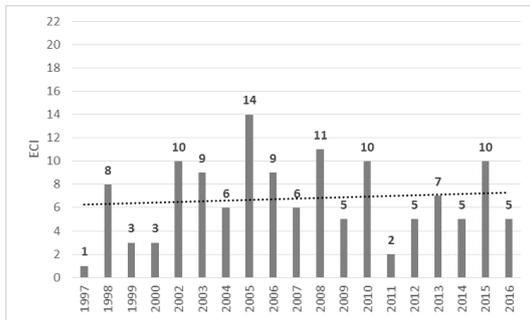
(p) Rio Centro



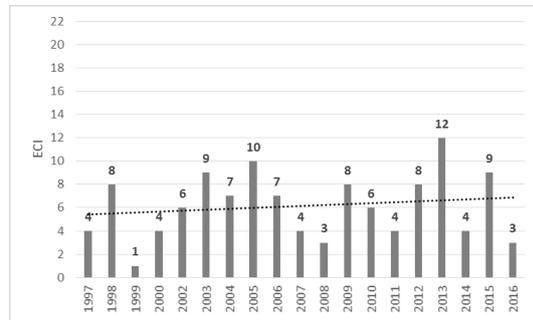
Apêndice IV – Continuação ...
(q) Seteiba



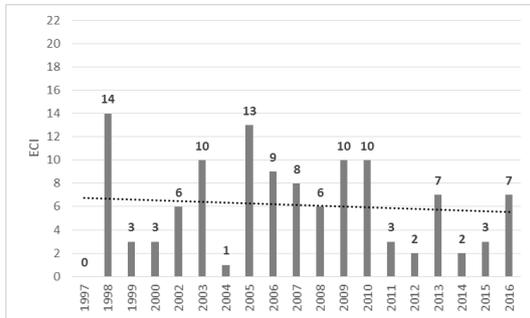
(r) Rocinha



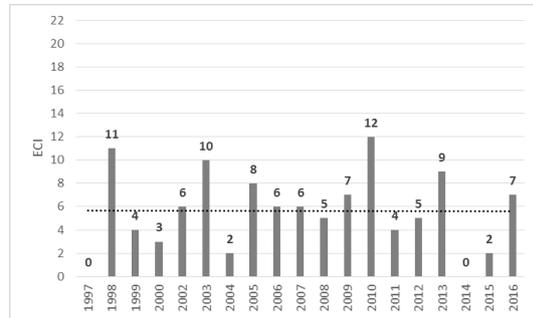
(s) Santa Cruz



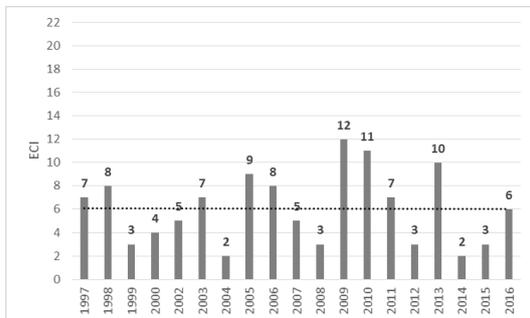
(t) Santa Tereza



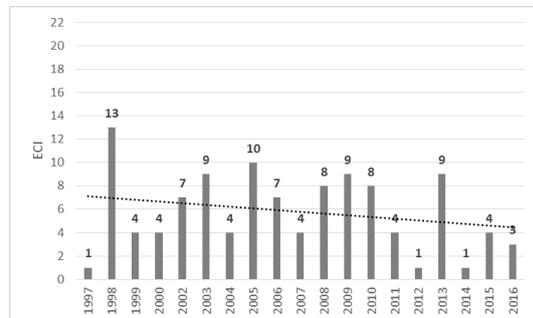
(u) Saúde



(v) Tanque

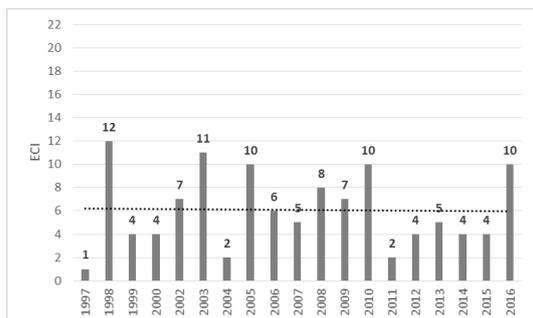


(w) Tijuca

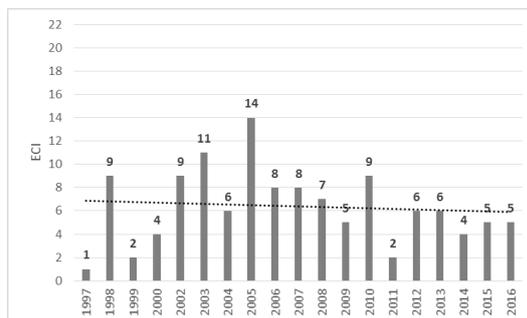


Apêndice IV – Final.

(x) Urca



(y) Vidigal



Apêndice V – Campos Sinóticos entre 13 e 15 de fevereiro de 2018.

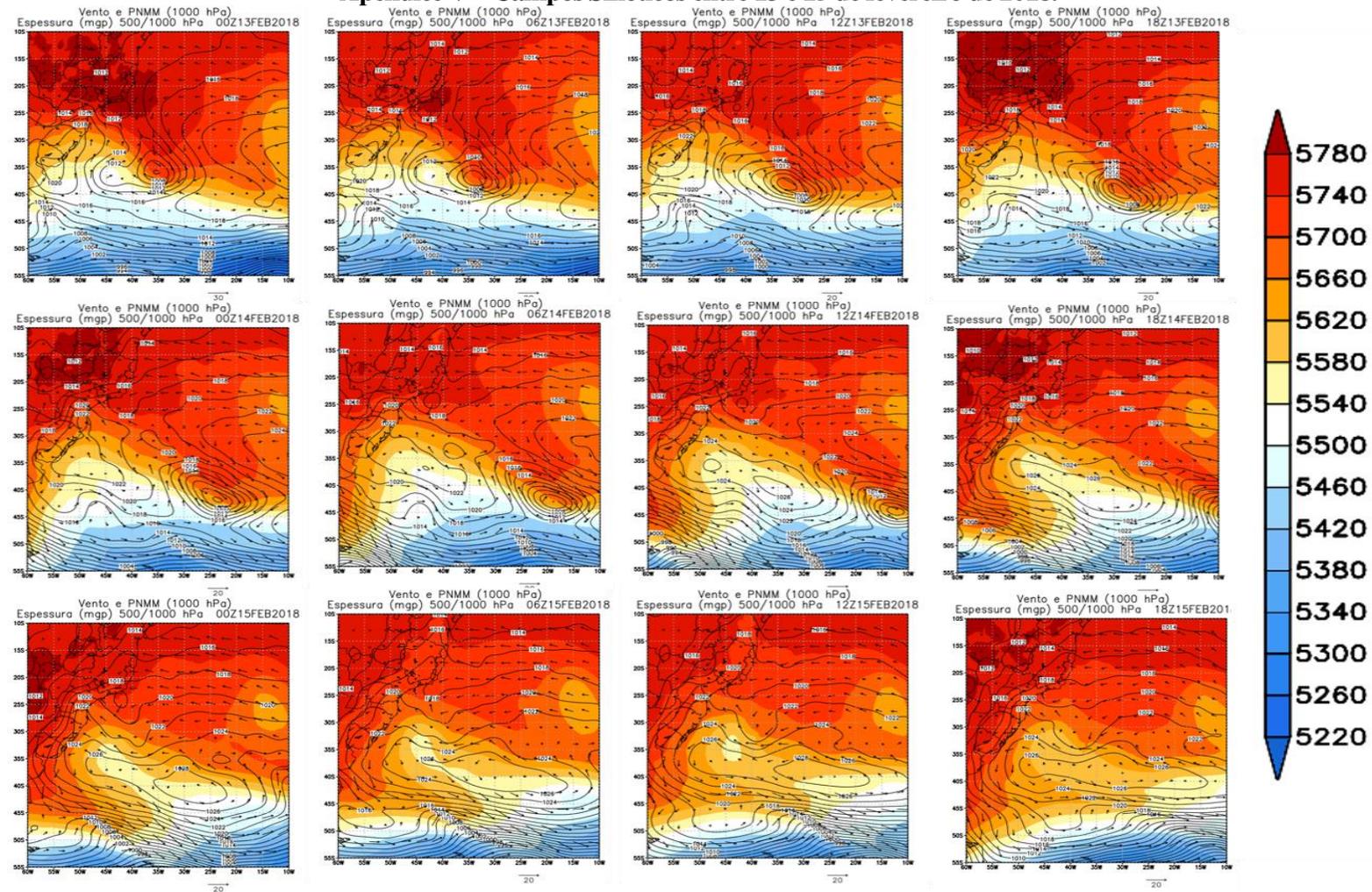


Figura V.a – Campo de pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 2 hPa) e espessura 500-1000 hPa (sombreado a cada 40 mgp) entre os dias 13 e 15 de fev. 2018.

Apêndice V – Continuação ...

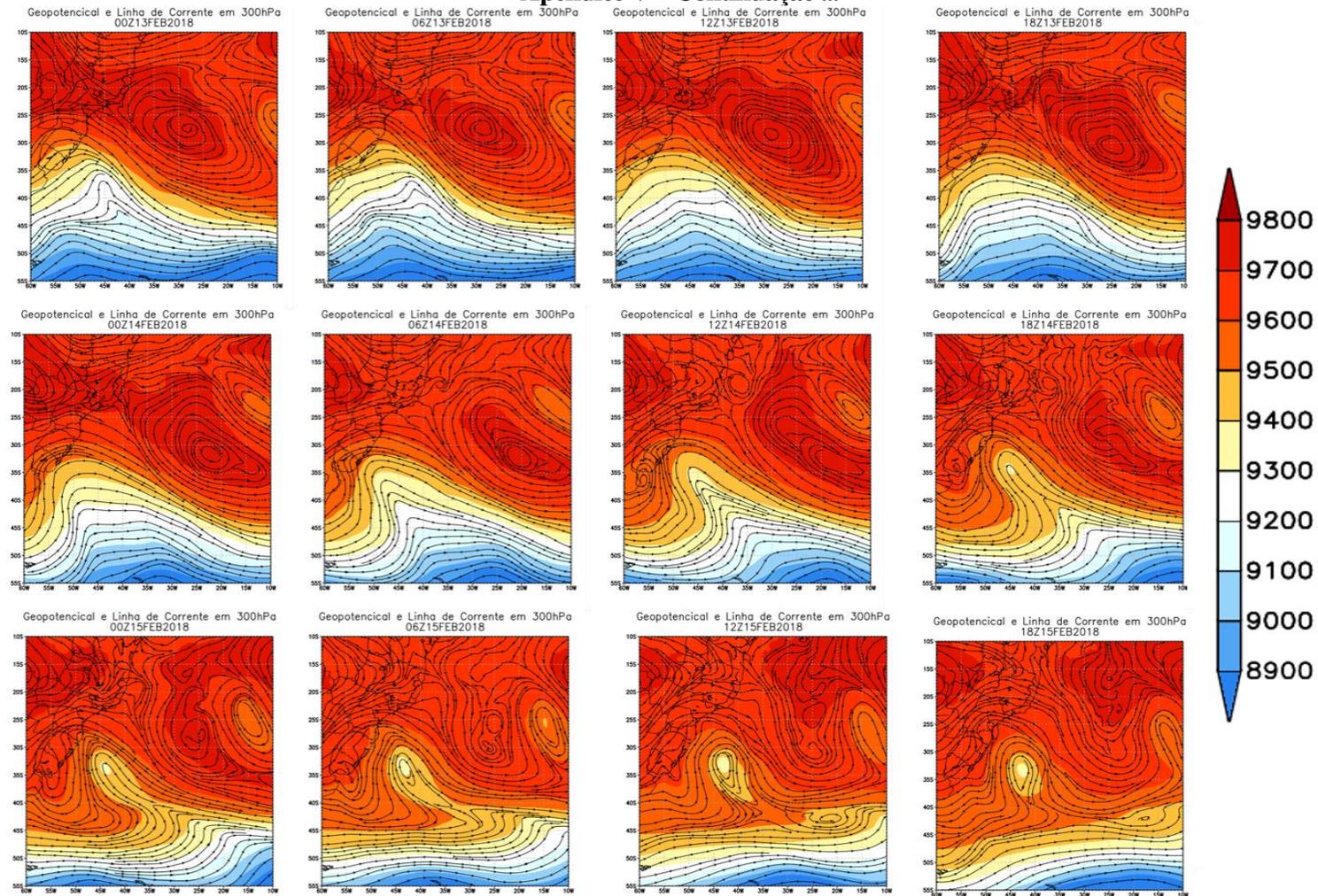


Figura V.b – Linhas de corrente e altura geopotencial (sombreado a cada 100 mgp) em 300 hPa entre os dias 13 e 15 de fev. 2018.

Apêndice V – Continuação ...

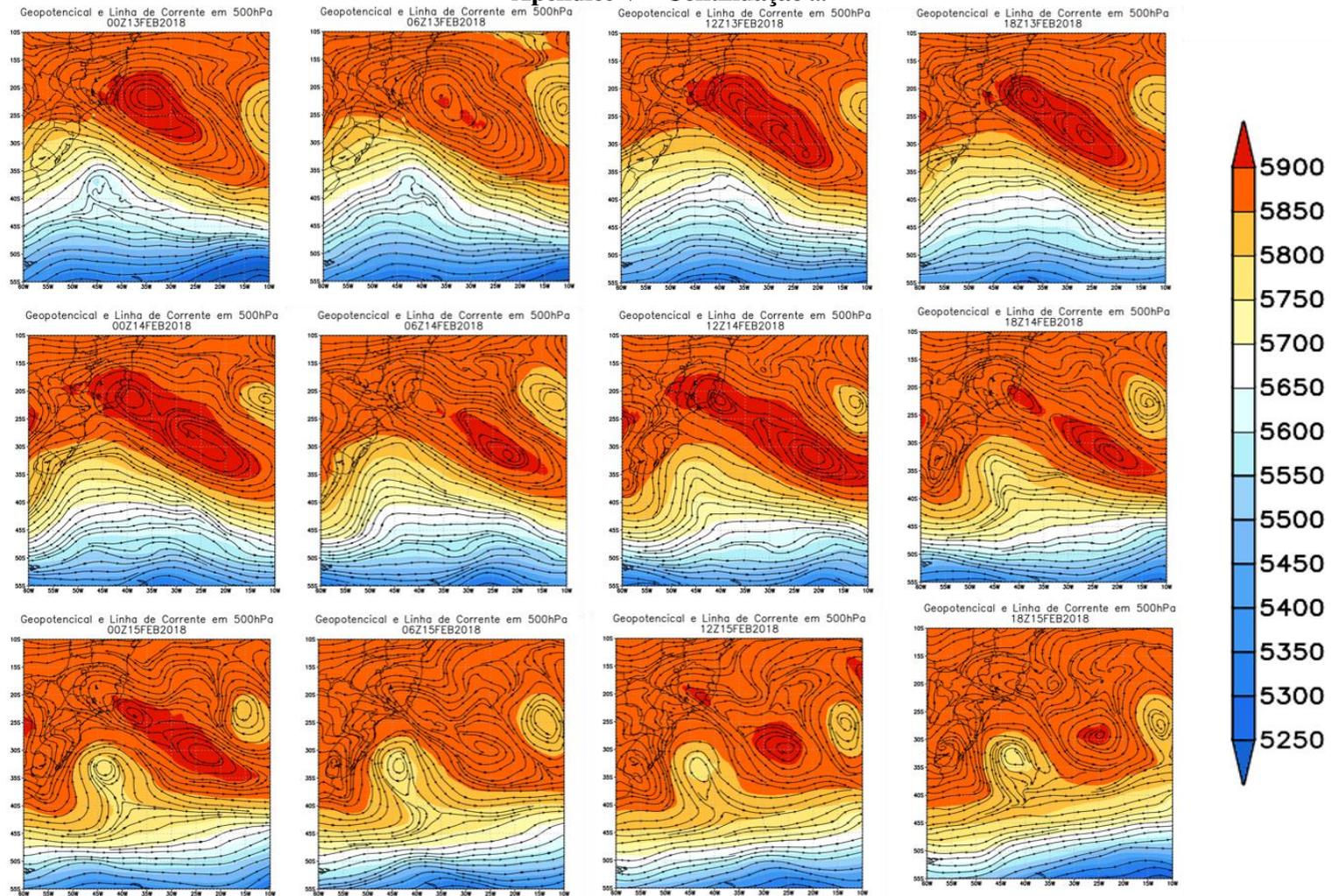


Figura V.c – Linhas de corrente e altura geopotencial (sombreado a cada 100 mgp) em 500 hPa entre os dias 13 e 15 de fev. 2018.

Apêndice V – Final.

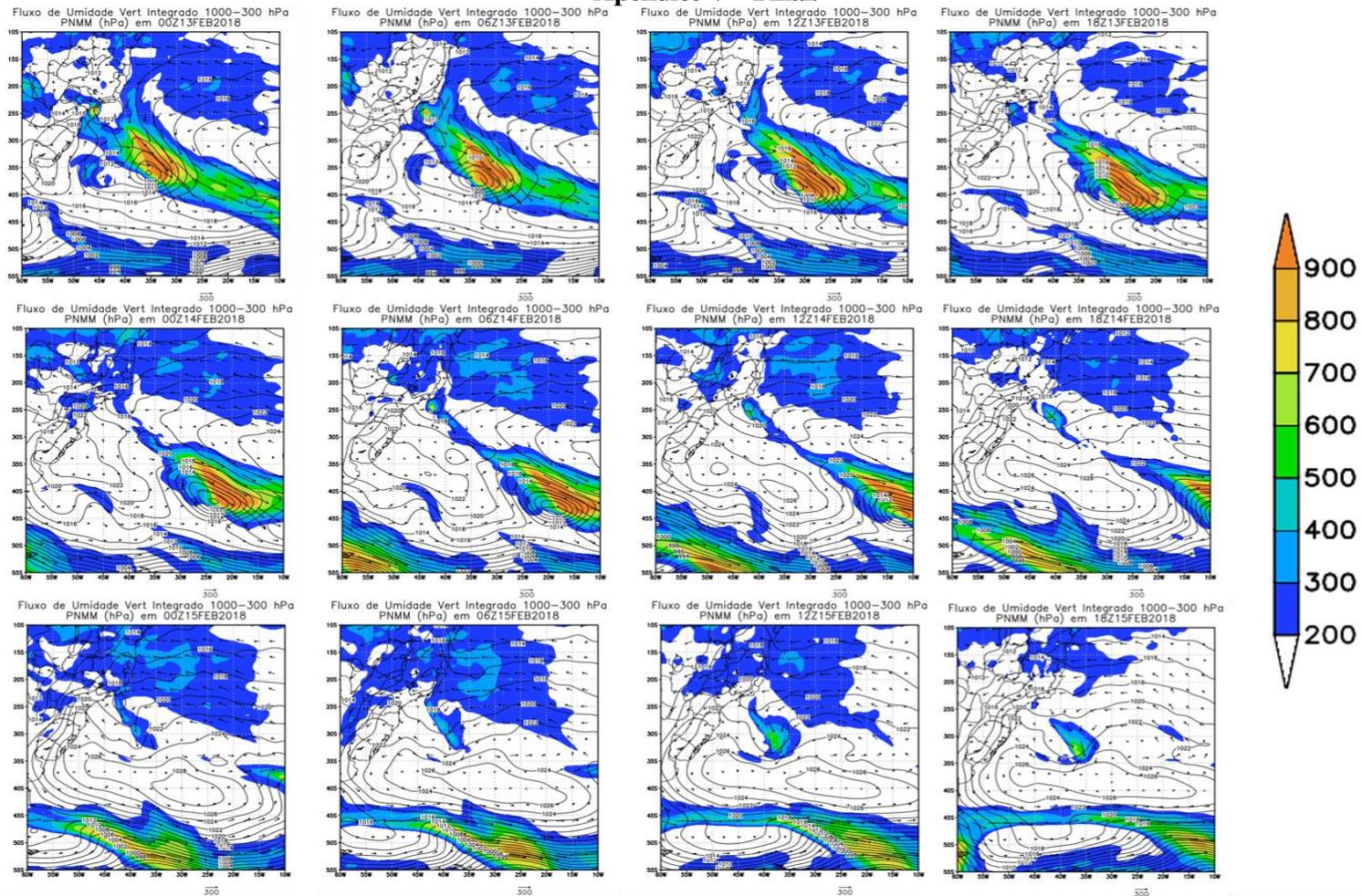


Figura V.d – Campos de fluxo de umidade verticalmente integrado entre 300 e 1000 hPa (sombreado a cada 100 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) e pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 2 hPa) entre os dias 13 e 15 de fev. 2018.

