



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza  
Instituto de Geociências  
Departamento de Meteorologia

**ESTUDO DE CASO DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO  
MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO EM ABRIL DE 2011**

Louise Caroline Carvalho dos Santos

*Orientadora:* D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

D. Sc. Edilson Marton

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ

Novembro, 2018

ESTUDO DE CASO DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO MUNICÍPIO DO RIO DE  
JANEIRO EM ABRIL DE 2011

Louise Caroline Carvalho dos Cantos

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção  
de grau de Bacharel em Meteorologia.

Aprovada por:

---

Prof.<sup>a</sup> D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

---

Prof. D. Sc. Edilson Marton

---

Prof. D. Sc. Wallace Menezes

---

Prof. D. Sc. Hugo Abi Karam

ESTUDO DE CASO DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO MUNICÍPIO DO RIO DE  
JANEIRO EM ABRIL DE 2011

DOS SANTOS, LOUISE CAROLINE

ESTUDO DE CASO DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO MUNICÍPIO DO RIO DE  
JANEIRO EM ABRIL DE 2011

[Rio de Janeiro], 2018

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Meteorologia

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo cuidado e força nesses seis anos de caminhada. Ele foi e sempre será meu guia e maior incentivador. Agradeço também a minha família por ter me apoiado nessa jornada. À minha mãe Geise pela criação e colo quando necessário e ao meu pai Marcelo e padrasto Geraldo pelo teto e segurança. Agradeço o apoio e o amor do meu namorado Dejalme e dos meus amigos Geanderson, Mayara, Victor e Fernando.

Após todo esse processo, tomo como aprendizado que nada é em vão e todo esforço compensa mais cedo ou mais tarde. Gostaria também de agradecer a todos aqueles professores e colegas que um dia duvidaram do meu potencial e com isso me desafiaram a fazer sempre além do necessário. Tento seguir à risca as sábias palavras que certa feita me foram ditas: “Não seja medíocre. Não se contente com a mediocridade.”

Agradeço pela vida dos meus professores do ensino fundamental, do ensino médio e dos professores do Departamento de Meteorologia que dão o seu melhor e não poupam esforços para contribuir com o crescimento acadêmico de cada aluno. Agradeço, especialmente, aos meus orientadores Claudine e Edilson pela paciência e pelo tempo dedicados a mim e a esse trabalho.

Obrigada!

## RESUMO

### ESTUDO DE CASO DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO EM ABRIL DE 2011

Louise Caroline Carvalho dos Santos – novembro/2018

No município do Rio de Janeiro, a presença dos maciços, a influência das Baías de Guanabara e de Sepetiba e do Oceano Atlântico e a ocorrência frequente de eventos de chuva intensa, tornam a região suscetível à ocorrência de deslizamentos, inundações, alagamentos e outros transtornos. Neste trabalho elabora-se um estudo de caso de chuva intensa na cidade do Rio de Janeiro no período de 24 a 26 de abril de 2011. O objetivo é identificar às características sinóticas associadas à ocorrência do evento e assim contribuir para a melhoria da previsão de tempo na região. Para elaboração do trabalho utiliza-se o conjunto de dados do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)* do *National Center for Environmental Prediction*, assim como dados observacionais convencionais. Os resultados mostram que com a chegada de uma frente fria sobre a região no dia 24 de abril, foi observada chuva intensa em diversos pontos da cidade. A seguir, na noite do dia 25 de abril houve forte intensificação da convecção sobre a cidade, ocasionando chuva intensa a muito intensa. No dia 26 de abril, seis postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio registraram acumulados acima de 100,0 mm/dia, com máximo de 276,0 mm/dia na estação Tijuca/Muda (quase o dobro do valor esperado para todo o mês). A análise do diagrama termodinâmico da estação do Galeão mostra muita umidade na baixa troposfera, seguida de uma forte redução nos níveis médios e altos, resultando em forte instabilidade termodinâmica, promovendo à ocorrência de tempestades. A análise sinótica com dados do CFSR indica intensificação do escoamento de sul em direção ao município nos baixos níveis durante o dia 25, devido à atuação de um anticiclone pós-frontal intenso centrado sobre a Região Sul do Brasil. Observa-se também no dia 25 o surgimento de um segundo cavado nos níveis médios e altos, na retaguarda do cavado frontal, que se intensifica até o dia seguinte. Durante o período de chuva intensa e muito intensa, a partir das análises em escala sinótica, não é possível identificar os mecanismos físicos responsáveis pela ondulação do sistema frontal observado nas imagens de satélite. Dessa forma, sugere-se para trabalhos futuros a simulação deste caso utilizando modelo de mesoescala.

## **ABSTRACT**

### **A CASE STUDY OF A HEAVY RAINFALL EVENT OVER RIO DE JANEIRO CITY IN APRIL 2011**

In the city of Rio de Janeiro, the presence of the mountains, the influence of the Guanabara and Sepetiba Bays and the Atlantic Ocean, and the frequent occurrence of heavy rainfall events turn the region susceptible to landslides, floods, and other disturbances. This work is a case study of a heavy rainfall event occurred from April 24<sup>th</sup> to 26<sup>th</sup>, 2011 in the city of Rio de Janeiro. The objective is to identify the synoptic characteristics associated with the occurrence of the event and thus to provide guidance to forecasters. The Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) from the National Center for Environmental Prediction along conventional observational data, is used to elaborate the work. The results show that with the arrival of a cold front on April 24<sup>th</sup>, a heavy rainfall was observed in several points of the city. Then, on the night of April 25<sup>th</sup>, there was a strong intensification of the convection over the city, causing heavy to very heavy rainfall. On April 26<sup>th</sup>, six observational sites of the Alerta Rio System registered precipitation above 100.0 mm/day, with a maximum of 276.0 mm/day in the Tijuca/Muda station (almost twice the climatological value for the whole month). The analysis of the thermodynamic diagram of the Galeão station shows high humidity in the lower troposphere, followed by a strong reduction in the middle and upper levels, resulting in thermodynamic instability, which is favorable to the occurrence of storms. The synoptic analysis with CFSR data indicates an intensification of the southern flow towards the city at low levels during the 25<sup>th</sup> due to the progression of an intense post-frontal anticyclone centered on the Southern Region of Brazil. It is also observed on the 25<sup>th</sup> the appearance of a second trough in the middle and upper levels, in the rear of the frontal trough, that intensifies until the following day. During the period of heavy and very intense rainfall, from the analysis on a synoptic scale, it was not possible to identify the physical mechanisms responsible for the frontal system undulation, as observed in the satellite images. Thus, it is suggested for future work the simulation of this case using a mesoscale model.

## ÍNDICE TEMÁTICO

<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	4
2.1 Sistemas Meteorológicos Associados à Casos de Chuva Intensa e Frequência .....	4
2.2 Análise de Casos Isolados de Chuva Intensa.....	5
2.3 Análise de Compostos de Eventos de Chuva Intensa.....	11
<b>3. Dados e Metodologia</b> .....	16
3.1 Reanálise CFSR.....	16
3.2 Precipitação Gerada Automaticamente.....	17
3.3 Precipitação Observada .....	18
3.4 Diagramas Skew-T e Meteogramas.....	18
3.5 Imagens de Satélite .....	18
3.6 Critérios para a Identificação de Chuva Intensa a Muito Intensa.....	18
<b>4. Resultados</b> .....	20
4.1 Chuva Observada.....	20
4.2. Análise das Imagens de Satélite e Dados Observacionais.....	24
4.3 Análise Sinótica.....	31
4.4 Síntese.....	43
<b>5. Conclusões e Considerações Finais</b> .....	44
<b>6. Referências Bibliográficas</b> .....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

- Figura 1.1** – Município do Rio de Janeiro com topografia em metros, destacando os Maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó. As estações do Sistema Alerta Rio ativas são representadas com círculos. As demais encontram-se inativas atualmente. Fonte: Pristo *et al.* 2018..... 1
- Figura 1.2** – Imagens capturadas na noite do dia 25/04: (a) Avenida Heitor Beltrão, Tijuca. (b) Endereço não informado, Tijuca. Fonte: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/04/temporal-provoca-queda-de-arvore-e-alaga-ruas-em-varios-pontos-do-rj.html>. ..... 2
- Tabela 2.1** – Limites para classificação de tempestade severa. Fonte: Nascimento (2005). ..... 6
- Figura 2.1** – Diagramas Skew-T para SGBL às: (a) 12000 UTC 12/12/2016 (b) 1600 UTC 12/12/2016 (c) 1800 UTC 12/12/2016 (d) 0000 UTC 13/12/2016. Fonte: Polifke *et al.* (2017). ..... 8
- Figura 2.2** – Diagrama Skew-T para SBGL às 0000 UTC do dia 18/03 de 2013. Fonte: Andrade *et al.* (2015). ..... 10
- Figura 2.3** – Compostos de anomalia de PNMM, negativa (linha tracejada) e positiva (linha contínua). Caso de chuva normal associada a SF: (a) 2 dias antes (b) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva normal associada a ZCAS (e) 2 dias antes (f) dia em que a ZCAS se forma. Caso de chuva intensa associada a SF: (c) 2 dias antes (d) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva intensa associada a ZCAS: (g) 2 dias antes (h) dia em que a ZCAS se forma. As áreas sombreadas representam significância de 90%. Fonte: Lima *et al.* (2010). ..... 13
- Figura 2.4** – Compostos de anomalia de altura geopotencial em 500 hPa, negativa (linha tracejada) e positiva (linha contínua). Caso de chuva normal associada a SF: (a) 2 dias antes (b) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva normal associada a ZCAS (e) 2 dias antes (f) dia em que a ZCAS se forma. Caso de chuva intensa associada a SF: (c) 2 dias antes (d) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva intensa associada a ZCAS: (g) 2 dias antes (h) dia em que a ZCAS se forma. As áreas sombreadas representam significância de 90%. Fonte: Lima *et al.* (2010). ..... 14
- Tabela 3.1** – Campos meteorológicos analisados e suas respectivas unidades. .... 17
- Tabela 3.2** – Classificação do evento de chuva de acordo com os percentis. Fonte: Pristo *et al.* (2018). ..... 19
- Figura 4.1** – Chuva ( $\text{mm. dia}^{-1}$ ), obtida do MERGE, das 1200 UTC do dia anterior até as 1200 UTC do dia em questão para: (a) 25/04/2011 e (b) 26/04/2011..... 20
- Figura 4.2** - Chuva acumulada em 24 horas ( $\text{mm. dia}^{-1}$ ), nas estações do Sistema Alerta Rio das 1200 UTC do dia anterior até as 1200 UTC do dia em questão para os dias 25/04/2011 e 26/04/2011. A linha vermelha destaca o valor de 57,2 mm/dia considerado como limiar de chuva intensa para todo MRJ. .... 21



<b>Figura 4.3</b> – Chuva horária (mm/h) na estação Tijuca/Muda das 1200 UTC do dia anterior até as 1200 UTC do dia em questão para os dias: (a) 25/04/2011 (b) 26/04/2011 (c) 27/04/2011. ....	23
<b>Figura 4.4</b> – Imagens do satélite Meteosat-9 no canal infravermelho (IV) (10,8 $\mu\text{m}$ ) com temperatura de topo das nuvens ( $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 0000 UTC 24/04, (b) 1200 UTC 24/04, (c) 1800 UTC 24/04, (d) 0000 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 2300 UTC 25/04, (g) 0100 UTC 26/04, (h) 0300 UTC 26/04, (i) 0600 UTC 26/04, (j) 1200 UTC 26/04, (k) 1800 UTC 26/04 e (l) 0000 UTC 27/04. Fonte: CPTEC/INPE. ....	26
<b>Figura 4.4</b> – Final. ....	27
<b>Figura 4.5</b> – Imagens do satélite GOES-12 no canal do infravermelho com temperatura de topo das nuvens ( $^{\circ}\text{C}$ ) no dia 26/04/2011: (a) 0000 UTC, (b) 0100 UTC e (d) 0200 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.....	28
<b>Figura 4.6</b> – Meteograma gerado com dados METAR da estação SBGL das 0600 UTC do dia 25/04 até as 0600 UTC do dia 26/04. Fonte: Modificado de <i>University of Wyoming</i> . ....	29
<b>Figura 4.7</b> – Diagramas Skew-T da SBGL às: (a) 1200 UTC 25/04 e (b) 0000 UTC 26/04. Fonte: Modificado de <i>University of Wyoming</i> .....	30
<b>Figura 4.7</b> – Final. ....	31
<b>Figura 4.8</b> - PNMM (hPa) (linha e sombreado) e vento em 850 hPa ( $\text{m.s}^{-1}$ ) (vetor): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04. ....	32
<b>Figura 4.8</b> – Final. ....	33
<b>Figura 4.9</b> - Divergência do vento em 1000 hPa ( $\times 10 - 5. s - 1$ ) (sombreado) e vento em 1000 hPa ( $\text{m.s} - 1$ ) (vetor): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.....	35
<b>Figura 4.9</b> – Final. ....	36
<b>Figura 4.10</b> - PNMM (hPa) (linha), magnitude do fluxo de umidade verticalmente integrado de 1000 a 300 hPa ( $\text{kg. m} - 1. s - 1$ ) (sombreado) e direção do fluxo de umidade verticalmente integrado ( $\text{kg. m} - 1. s - 1$ ) (vetor): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.....	37
<b>Figura 4.10</b> – Final. ....	38
<b>Figura 4.11</b> - PNMM (hPa) (linha) e espessura da camada entre 1000 e 500 hPa (mgp) (sombreado): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04. ....	39
<b>Figura 4.11</b> – Final. ....	40

<b>Figura 4.12</b> – Linhas de corrente em 250 hPa e altura geopotencial em 250 hPa (sombreado): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04. ....	41
<b>Figura 4.12</b> – Final. ....	42

## 1. Introdução

O município do Rio de Janeiro (MRJ) localiza-se no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro e é banhado pelo oceano Atlântico ao sul, pela Baía de Guanabara a leste e pela Baía de Sepetiba a oeste (Figura 1.1). A cidade também é marcada por três maciços que desempenham um importante papel na forma como atuam os sistemas meteorológicos transientes e permanentes observados sobre a região.

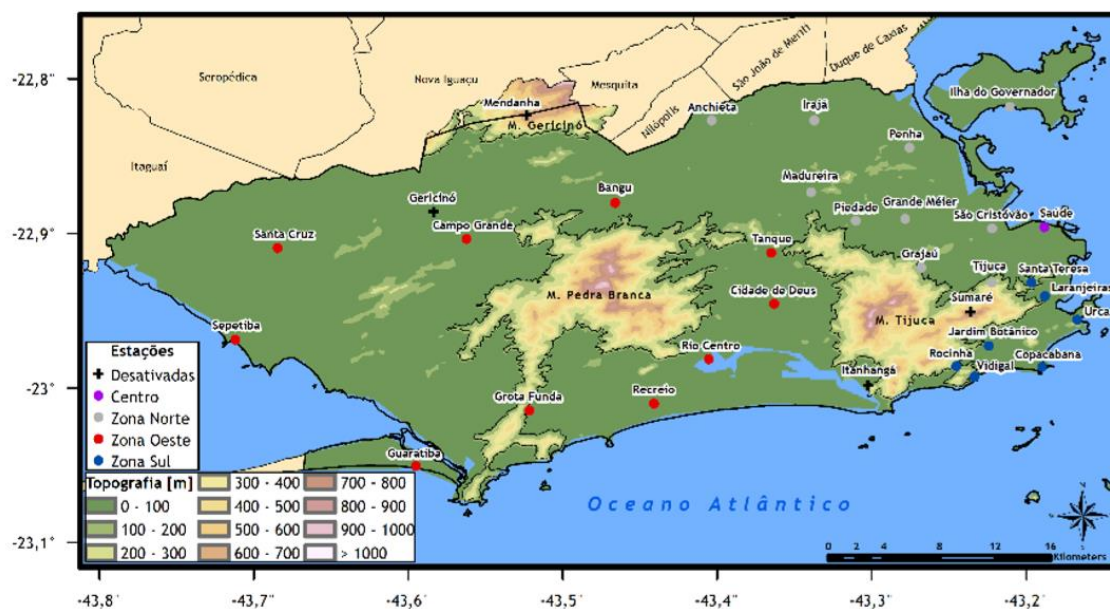


Figura 1.1 – Município do Rio de Janeiro com topografia em metros, destacando os Maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó. As estações do Sistema Alerta Rio ativas são representadas com círculos. As demais encontram-se inativas atualmente. Fonte: Pristo *et al.* 2018.

Economicamente, de acordo com o IBGE 2015, o Estado do Rio de Janeiro possui a segunda maior porcentagem do Produto Interno Bruto (PIB) do país, estando em primeiro lugar o Estado de São Paulo. O último Censo Demográfico produzido pelo IBGE em 2010, classifica a urbanização do MRJ em 100% e estima a população em cerca de 6.320.446 habitantes com densidade demográfica de 5.265,82 habitantes/km<sup>2</sup>. A cidade do Rio de Janeiro se destaca das demais regiões Fluminenses não somente devido ao seu nível de industrialização e urbanização, mas também devido ao seu *status* internacional.

A climatologia da precipitação no MRJ é marcada pela passagem de sistemas frontais e pela formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que estão frequentemente associadas à eventos de chuva intensa sobre a região (Dereczynski *et al.* 2009). Devido à alta concentração demográfica e terreno montanhoso, e a frequente ocorrência de eventos de chuva intensa, o MRJ mostra-se suscetível à ocorrência de deslizamentos, enchentes, alagamentos e outros distúrbios, que afetam a cidade e sua

população (Andrade e Cavalcanti, 2018). Segundo Dereczynski *et al.* (2017), a maioria dos casos de chuva intensa ocorre no verão (40%) e outono (40%), com menor frequência na primavera (10%) e inverno (10%).

No dia 24 de abril de 2011, uma frente fria deslocou-se sobre o oceano, próximo ao MRJ, ocasionando chuva forte e transtornos na cidade. A seguir, na noite do dia 25/04 e na madrugada do dia 26/04, a chuva aumentou de intensidade, caracterizando-se como chuva intensa a muito intensa. No dia 26 de abril, seis postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio registraram acumulados acima de 100,0 mm/dia, com máximo de 276,0 mm/dia na estação Tijuca/Muda, quase o dobro do valor esperado para todo o mês de abril. Na história do Sistema Alerta Rio, esse é o quarto maior valor observado entre os anos de 1997 e 2016, sendo os três primeiros registrados no desastre de abril de 2011 (<<http://alerta.rio.rj.gov.br/maiores-chuvas/>>). Na Tijuca/Muda entre 0000 e 0100 UTC a precipitação atingiu 97,8 mm. De acordo com Braga *et al.* (2017), o período de retorno para uma chuva como essa (97,8 mm/h) é de aproximadamente 41 anos. Como consequência, ocorreram alagamentos, queda de árvores e transbordamento do Rio Maracanã (Figura 1.2), afetando toda a cidade, principalmente a Zona Norte.

(a)



(b)



Figura 1.2 – Imagens capturadas na noite do dia 25/04: (a) Avenida Heitor Beltrão, Tijuca. (b) Endereço não informado, Tijuca. Fonte: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/04/temporal-provoca-queda-de-arvore-e-alaga-ruas-em-varios-pontos-do-rj.html>.

O objetivo deste trabalho é identificar os principais mecanismos dinâmicos e termodinâmicos responsáveis pela ocorrência do evento ocorrido no final de abril de 2011. A expectativa é de que os resultados aqui encontrados possam contribuir para a melhoria da previsão do tempo nos centros operacionais do país.

No próximo capítulo elabora-se uma revisão bibliográfica sobre eventos de chuva intensa associados à sistemas frontais, associados à ZCAS e as características termodinâmicas da atmosfera observadas durante tais eventos. No Capítulo 3, são apresentados os dados utilizados e a metodologia adotada para execução deste trabalho. No Capítulo 4, estão os resultados relativos ao estudo do caso de abril de 2011. No último capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais.

## **2. Revisão Bibliográfica**

A maioria dos trabalhos que trata de eventos de chuva intensa, se dedica a estudos de casos isolados (Marques *et al.*, 2001; Brasiliense *et al.*, 2017; Quadro *et al.*, 2016; Baima e Karam, 2014; Andrade *et al.*, 2015). Outros trabalhos se baseiam na investigação de composição de casos, denominados de compostos (Lima *et al.*, 2010; Moura *et al.*, 2013; Seluchi *et al.*, 2016). Em geral os pesquisadores se apoiam na investigação de índices de instabilidade e de campos de circulação atmosférica para identificar os principais mecanismos em escala sinótica responsáveis pelos eventos de chuva intensa.

Neste capítulo elabora-se na Seção 2.1 uma revisão da literatura sobre trabalhos que investigam os sistemas atuantes durante casos de chuva intensa e/ou a frequência na qual tais casos são observados. Nas Seções 2.2 e 2.3 são apresentados resultados de trabalhos que respectivamente, tratam de estudos de casos isolados e os que utilizam compostos em suas análises.

### **2.1 Sistemas Meteorológicos Associados à Casos de Chuva Intensa e Frequência**

Os principais sistemas meteorológicos responsáveis por eventos de chuva intensa sobre a Região Sudeste do Brasil são a ZCAS (Quadro, 1994; Kodama *et al.* 2012; Pinheiro *et al.* 2011; Andrade e Pinheiro, 2012; Nielsen *et al.* 2018) e os SFs (Satyamurty *et al.* 1998; Dereczynski *et al.* 2009; Seluchi *et al.* 2010). Em Teixeira e Satyamurty (2007) e Dereczynski *et al.* (2009), também são apontados como causadores de chuva intensa, sistemas convectivos isolados que diversas vezes surgem embebidos nos sistemas de escala maior.

Para o período entre 1997 e 2006, Dereczynski *et al.* (2009) identificaram 160 eventos de chuvas intensa no MRJ. A classificação foi feita considerando um limiar mínimo de 30 mm em 24 horas em no mínimo 5 das 30 estações do Sistema Alerta Rio. Seus resultados indicam que cerca de 77% dos eventos estavam associados à SFs, uma vez que esses ocorrem durante todo o ano. Cerca de 13% dos casos estavam associados a eventos de ZCAS. Também no período estudado, foram identificados 8 eventos de chuva intensa que estavam associados à Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) embebidos nos sistemas de maior escala.

Em Dereczynski *et al.* (2017) para o período entre 1981 e 1996, foram encontrados 82 casos de chuva intensa (total pluviométrico superior a 100 mm/dia) que ocasionaram grandes danos à cidade do Rio de Janeiro e à população carioca. Infelizmente não existe

nesse trabalho uma classificação dos sistemas meteorológicos responsáveis pela chuva intensa nesses 82 eventos encontrados. De acordo com os autores são observados em média 1,3 evento extremo por ano na cidade, sendo 40% no verão, 40% no outono, 10% na primavera e 10% no inverno.

Marques *et al.* (2001) documentaram os doze principais temporais ocorrido na cidade do Rio de Janeiro no período de 1962 a 1996, identificando os mecanismos atmosféricos de grande escala e de mesoescala a eles associados. Os sistemas apontados são: ZCAS, SFs, estruturas cumuliformes e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs).

Penna e Neto (2014) analisaram eventos de chuva intensa de 2000 a 2010 na cidade de São Paulo. Os autores utilizaram 50 mm/dia como valor limítrofe para classificação de um evento de chuva intensa. Assim, foram detectados 22 casos de chuva intensa: 50% estavam associados à atuação de SFs, 13,6% associados à ZCAS e 36,4% estavam associados à sistemas fora da escala sinótica.

Pristo *et al.* (2018) estabeleceram um critério objetivo para caracterização de casos de chuva intensa utilizando os percentis obtidos para cada estação do Sistema Alerta Rio. De acordo com os autores, um evento de chuva intensa se caracteriza por um total pluviométrico diário superior a seu percentil 95, com ocorrência no mesmo dia de pelo menos, um registro de chuva em 15 minutos também superior a seu percentil 95. Em média os casos de chuva intensa ocorrem com maior frequência no verão (43,7%), seguido do outono (30,9%), primavera (18,2%) e inverno (7,2%). Com relação à distribuição espacial dos eventos de chuva intensa sobre a cidade, nota-se que os máximos (mínimos) são observados no Sumaré e Mendanha (na Saúde e Tijuca), numa média 30 dias de chuva intensa por ano, com a maior parte deles (70%) ocorrendo entre dezembro e abril.

## **2.2 Análise de Casos Isolados de Chuva Intensa**

Brasiliense *et al.* (2017) analisaram um caso de chuva intensa sobre a bacia do Rio Paraíba do Sul que ocorreu após a chegada de um SF no dia 01/01/2000. Após a chegada do SF sobre São Paulo nesse dia (01/01), configurou-se em 02/01 sobre a região, um evento de ZCAS que durou por 8 dias. No dia 03/01 foram registrados 192,0 mm/dia em Cruzeiro, 153,0 mm/dia em Bananal, 143,0 mm/dia em São José do Barreiro e 107,0 mm/dia em Pindamonhangaba. Segundo esse estudo, a ZCAS foi sustentada pela

convergência entre o ar úmido e quente proveniente da Amazônia com ar proveniente do oceano Atlântico. Um padrão de bloqueio tipo dipolo estabelecido nos baixos e médios níveis da atmosfera sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul, formados por um ciclone de núcleo frio e um anticiclone de núcleo quente, ambos com estrutura barotrópica, enfraqueceu o escoamento de oeste promovendo a estacionaridade da ZCAS. A formação de um vórtice ciclônico embebido na ZCAS (VCEZ), próximo ao litoral Sudeste, intensificou ainda mais a convergência de umidade sobre a região. Através da simetria (não frontal) do VCEZ e de condições do gradiente térmico na baixa e alta troposfera, pode-se dizer que esse sistema possuiu características subtropicais durante os primeiros dias e posteriormente se tornou um ciclone extratropical.

Nascimento (2005) reuniu em seu trabalho diversos estudos relacionados aos índices de instabilidade termodinâmicos. A maioria dos estudos sobre os índices de instabilidade foram feitos com base na climatologia das latitudes médias da América do Norte. Em seu trabalho, Nascimento (2005) destaca que tais índices podem ser utilizados na América do Sul, principalmente para a detecção de SCMs na Região Sul do Brasil. Segundo o levantamento feito pelo autor, os valores limítrofes que indicam a possibilidade de formação de tempestades severas para os índices *Convective Available Potential Energy* (CAPE) (Doswell e Rasmussen, 1994), *Lifted Index* (LI) (Galway, 1956), K (George, 1960) e Total Totals (TT) (Miller, 1972) são os apresentados na Tabela 2.1. As definições desses e de outros índices de instabilidade podem ser consultados em Nascimento (2005) e/ou Rangel (2014).

Tabela 2.1 – Limites para classificação de tempestade severa. Fonte: Nascimento (2005).

<b>CAPE (<math>J.kg^{-1}</math>)</b>	<b>K (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Total Totals (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Lifted Index (<math>^{\circ}C</math>)</b>
1000 – 2500	30 - 40	40 – 50	< -5

Polifke *et al.* (2017) analisaram o comportamento termodinâmico da atmosfera juntamente à índices de instabilidade (TT, LI, K e CAPE) para dois eventos (29/11/2016 e 12/12/2016) cuja previsão do Global Forecasting System (GFS) indicava chuva sobre o MRJ após a passagem de um SF. Os dados foram obtidos de radiossondagens do Galeão (SBGL) às 1200 UTC e 0000 UTC e adicionalmente, às 1600 UTC e 1800 UTC, com radiossondas obtidas por iniciativa do Centro de Tecnologia da UFRJ. No dia 29/11/2016 não houve ocorrência de precipitação convectiva, porém, no dia 12/12/2016 foram



registrados, em apenas duas horas, 100,8 mm no Méier, 74,6 mm em Anchieta, 64,6 mm em Madureira e 56,8 mm em Piedade. Nesse dia (12/12), notava-se uma camada “quase saturada” persistente entre os níveis de 900 e 400 hPa, como mostra a Figura 2.1. Na Figura 2.1b, às 1600 UTC, nota-se um alto valor de CAPE ( $3726,1 \text{ J.kg}^{-1}$ ) devido ao aquecimento diurno e à advecção de ar quente marcada pelo giro anti-horário do vento com a altura. Os autores apontam que o índice K, nos dias 29/11 e 12/12, estavam acima de  $30^{\circ}\text{C}$ , sendo o máximo observado às 1800 UTC do dia 12/12 (Figura 2.1e), aproximadamente,  $38^{\circ}\text{C}$ . O índice TT mostrou-se alto (acima de  $40^{\circ}\text{C}$ ) em ambos os dias. O LI não apresentou valores favoráveis à formação de tempestades em nenhum horário em ambos os dias. O fator sinótico decretou a diferença entre os casos do dia 29/11 e 12/12. No dia 29/11, houve advecção de ar frio sobre o MRJ que inibiu a convecção. Já no dia 12/12, a aproximação de um SF favoreceu a formação de pequenos centros de baixa pressão e garantiu suporte cinético para a convecção.

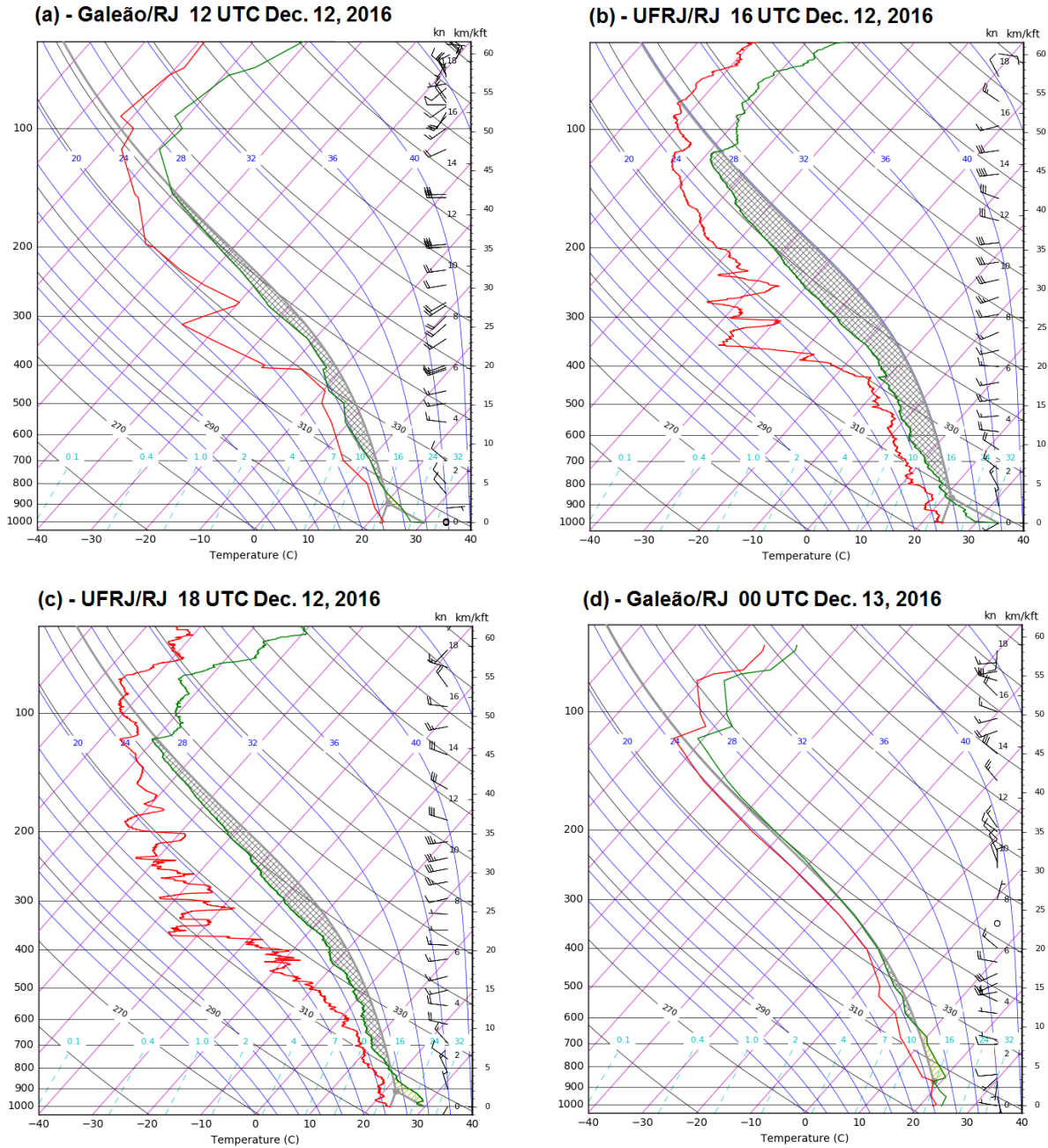


Figura 2.1 – Diagramas Skew-T para SGBL às: (a) 1200 UTC 12/12/2016 (b) 1600 UTC 12/12/2016 (c) 1800 UTC 12/12/2016 (d) 0000 UTC 13/12/2016. Fonte: Polifke *et al.* (2017).

Siqueira e Marques (2016) estudaram as características de SCMs embebidos em um SF que ocasionaram tempestades sobre o Estado do Rio de Janeiro nos dias 02/01/2013 e 03/01/2013. Termodinamicamente, os diagramas Skew-T de SBGL de 1200 UTC do dia 02/01 e 0000 UTC do dia 03/01, apresentavam muita umidade na baixa troposfera e forte redução de umidade acima de 700 hPa. Logo, o ambiente atmosférico era extremamente favorável ao desencadeamento da convecção profunda. Os autores observaram também que houve forte cisalhamento do vento nos baixos níveis da

atmosfera durante a tempestade. Os índices de instabilidade à 0000 UTC do dia 03/01, também eram favoráveis à formação de tempestades:  $CAPE=1159,0 \text{ J.kg}^{-1}$ ,  $TT=48,0^{\circ}\text{C}$  e  $K=39,5^{\circ}\text{C}$ . Porém, o índice de levantamento (LI) era acima do esperado para formação de tempestades ( $LI= -3,8^{\circ}\text{C}$ )

Quadro *et al.* (2016) utilizaram uma simulação numérica do modelo BRAMS 4.2 para analisar o comportamento de vórtices ciclônicos de mesoescala associados à eventos de ZCAS. Um dos casos apresentados pelos autores ocorreu entre os dias 22/01/2009 e 25/01/2009 e ocasionou chuva intensa sobre o Estado do Mato Grosso. Às 0300 UTC do dia 24/01, foi observada a intensificação máxima do vórtice ciclônico. Nesse horário, a atmosfera sobre a região onde se localizava o centro do vórtice, mostrava-se saturada em toda sua extensão vertical, exceto na camada entre os níveis de 850 e 600 hPa, onde ocorria subsidência associada à presença de ar relativamente mais seco. A CAPE observada nesse horário (0300 UTC) não apresentava potencial para formação de tempestades severas e o cisalhamento vertical do vento não era significativo.

Baima e Karam (2014) apresentam uma análise termodinâmica da estrutura vertical das variáveis conservativas, temperatura potencial, temperatura potencial equivalente e temperatura potencial equivalente de saturação associadas à tempestade ocorrida entre 17/03/2013 e 18/03/2013 no Estado do Rio de Janeiro. Entre as consequências provocadas por esse evento, os pesquisadores destacam 34 mortes, deslizamentos de encosta e enchentes urbanas e vultosos prejuízos. Os autores argumentam que o acoplamento entre uma frente fria sobre o Oceano Atlântico e um canal de umidade estabelecido sobre o centro-oeste brasileiro resultou na formação de precipitações elevadas na parte norte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e também na Região Serrana do RJ (RSRJ). Dados de radiossondagens indicaram forte instabilidade condicional no dia 17/03, associada à intensa advecção de ar úmido e forte cisalhamento do vento de sul na Camada Limite Superficial (CLS) sobre a RMRJ. As condições termodinâmicas favoreceram a organização e manutenção de convecção forçada associada ao desenvolvimento vertical de uma tempestade na noite de 17 para a manhã do dia 18/03/2013, sobre a RSRJ.

O mesmo evento (17/03/2013 a 18/03/2013) foi estudado por Andrade *et al.* (2015). No dia 18/03 foram registrados 424,5 mm/dia em Petrópolis, 213,6 mm/dia em Teresópolis e 182,6 mm/dia em Nova Friburgo. Seus resultados indicam que atuava sobre a região, um SF seguido por um anticiclone pós-frontal intenso que se posicionava ao sul do Uruguai e estabelecia um escoamento de sul perpendicular à costa do Rio de Janeiro.

Nesse trabalho os autores analisaram o perfil vertical da atmosfera com um diagrama Skew-T da estação SBGL às 0000 UTC 18/03 (Figura 2.2). A atmosfera encontrava-se totalmente saturada e foram observados ventos intensos de sul nas primeiras camadas. Os índices de instabilidade, exceto LI e CAPE, eram favoráveis à formação de tempestades severas: TT=44,0°C e K=37,0°C. Os autores apontam a orografia da região junto ao escoamento de sul e umidade disponível, como gatilhos para a forte convecção que resultou em chuvas torrenciais.

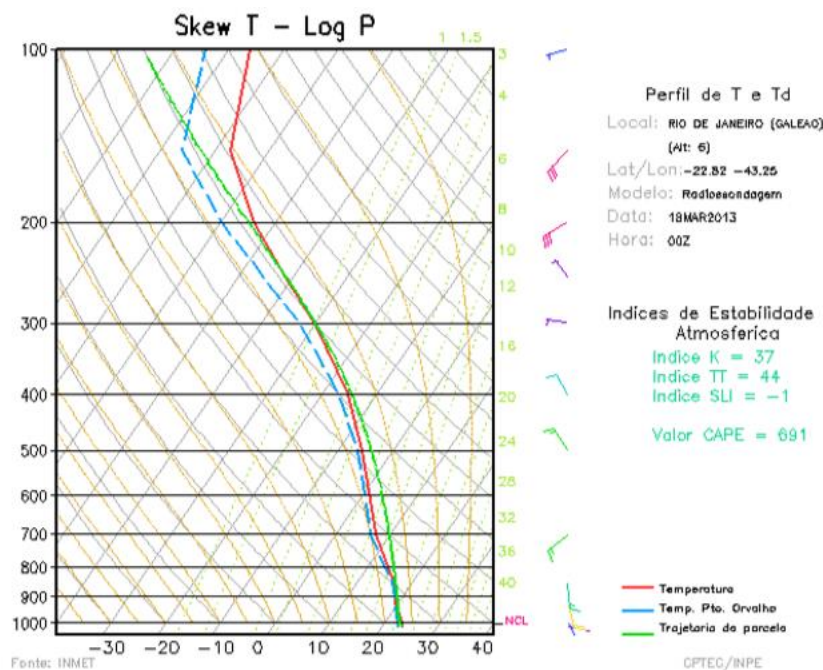


Figura 2.2 – Diagrama Skew-T para SBGL às 0000 UTC do dia 18/03 de 2013. Fonte: Andrade *et al.* (2015).

Marques *et al.* (2001) estudaram o caso de chuva intensa sobre o MRJ ocorrido entre os dias 01/02/1988 e 05/02/1988. Houve três tempestades distintas: uma no final do dia 01/02, outra no final do dia 02/02 e uma durante o dia 05/02. No dia 01/02, a banda de nebulosidade do SF atuante sobre a região, permaneceu confinada entre a Serra do Mendanha e o Maciço da Pedra Branca, favorecendo a convecção local. Nesse dia (01/02) na SBGL a temperatura do ar sofreu forte elevação, passando de 26°C às 05:00 h para 37°C às 12:00 h local e logo após sofreu reduções, chegando a 24°C às 18:00 h local. O vento era predominantemente de norte pela manhã, rondou para sudeste às 12:00 h e permaneceu assim até as 15:00 h quando rondou para sudoeste. Às 1200 UTC do dia 02/02 a cidade do Rio de Janeiro já estava sobre a atuação do anticiclone pós-frontal com ventos de noroeste rondando para sudoeste após a chuva intensa entre 21:00 h e 22:00 h

local. A sondagem das 1200 UTC do dia 02/02 mostrou uma camada relativamente mais úmida da superfície ao nível de 730 hPa. A camada entre 730 e 300 hPa mostrava-se relativamente mais seca. Nos dias 04/02 e 05/02 o SF intensificou-se devido ao transporte de umidade e calor proporcionado pelos escoamentos do anticiclone pós-frontal e Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

### **2.3 Análise de Compostos de Eventos de Chuva Intensa**

Seluchi *et al.* (2016) elaboraram para a Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ) uma comparação entre os SFs causadores de chuva intensa e os SFs comuns. O estudo tem como base o período de 1998 a 2010, e os SFs foram classificados como “chuvoso” e “não chuvoso” baseado nos valores acumulados diários de precipitação. Os autores elaboram uma comparação entre o ambiente sinótico observado em um caso de chuva intensa e o ambiente observado em um caso comum. Segundo eles, a grande diferença entre os SFs “chuvosos” e “não chuvosos” é o contraste térmico vinculado à presença dos cavados e cristas. No ambiente sinótico associado aos SFs “chuvosos” nota-se a presença de um cavado frontal relativamente intenso e de um anticiclone pós-frontal que chega a atingir latitudes mais baixas. Essa configuração permite um contraste de temperatura relativamente acentuado. O avanço do SF “chuvoso” é rápido, saindo do Uruguai e atingindo o Rio de Janeiro em apenas 48 horas.

Moura *et al.* (2013) encontraram três tipos de padrões sinóticos que causaram eventos chuva intensa no MRJ durante o período de 1997 a 2010. Na seleção dos casos de chuva intensa foi utilizado como limiar o percentil 95 dos acumulados em 24 horas em 9 estações do Sistema Alerta Rio, selecionando-se 145 casos. Semelhantemente a Lima *et al.* (2010), foi feita em Moura *et al.* (2013) uma classificação sinótica de acordo com os campos de PNMM e de altura geopotencial em 500 hPa. Os autores apontam a passagem de SFs como os maiores causadores de chuva intensa sobre o MRJ. O padrão mais frequentemente encontrado foi de uma frente fria clássica de verão, com pouco avanço sobre latitudes menores, acompanhada de um cavado pouco amplificado em 500 hPa. O segundo padrão encontrado foi de uma frente fria seguida de um forte anticiclone pós-frontal. Esse padrão, mais frequente no inverno, indica que casos de chuva intensa também podem ocorrer fora do verão, como havia sido ressaltado em Dereczynski *et al.* (2017). O terceiro padrão detectado mostra a atuação do anticiclone pós-frontal posicionado a leste da Região Sul, mantendo ventos de quadrante sul sobre o MRJ. Esses

ventos advectam ar úmido para dentro do continente e a presença da orografia auxilia a formação de núcleos convectivos sobre a cidade.

Lima *et al.* (2010) analisaram casos de chuva intensa sobre a Região Sudeste do país entre os anos de 1960 e 2005. A classificação de um evento como chuva intensa foi feita utilizando o percentil 99. Se o acumulado diário de precipitação atingisse ou ultrapasse o percentil 99 em 10 ou mais estações, o evento era classificado como chuva intensa. Assim, foram identificados 157 casos nos 46 anos analisados. Dentre esses, 53% estavam associados a atuação de um SF sobre a região e 47% estavam associados a atuação de ZCAS. Os autores compararam campos atmosféricos característicos de casos de chuva normal com campos para casos de chuva intensa, ambos associados a passagens de SFs e formação de ZCAS, para 2 dias antes do evento de chuva (D-2) e para o dia do evento de chuva (D0). Os compostos utilizados foram: i) anomalias de pressão no nível médio do mar (PNMM) (Figura 2.3) e ii) anomalias de altura geopotencial em 500 hPa (Figura 2.4). Na Figura 2.3c, dois dias antes do caso de chuva intensa, pode-se notar anomalias mais negativas no campo de PNMM sobre as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste se comparado às anomalias de PNMM dois dias antes de um caso de chuva normal (Figura 2.3a). Na Figura 2.3g, dois dias antes de um caso de chuva intensa associado a ZCAS, notam-se anomalias negativas de PNMM em quase todo o território nacional e o oceano Atlântico muito mais intensas do que aquelas observadas dois dias antes em um caso de chuva normal (Figura 2.3e). No dia do caso de chuva intensa associado a um SF (Figura 2.3d) e a ZCAS (Figura 2.3h), as anomalias se intensificam ainda mais e surgem também, anomalias positivas sobre a Argentina sendo explicadas pela atuação do anticiclone pós-frontal. No campo de anomalia de altura geopotencial em 500 hPa (Figura 2.4), fica evidente a diferença entre os casos. Nas Figuras 2.4c, 2.4d, 2.4g e 2.4h, a intensidade dos cavados e cristas que formam o trem de ondas sobre os oceanos e o continente da América do Sul, é visivelmente maior do que nos casos normais (Figura 2.4a, 2.4b, 2.4e, 2.4f).

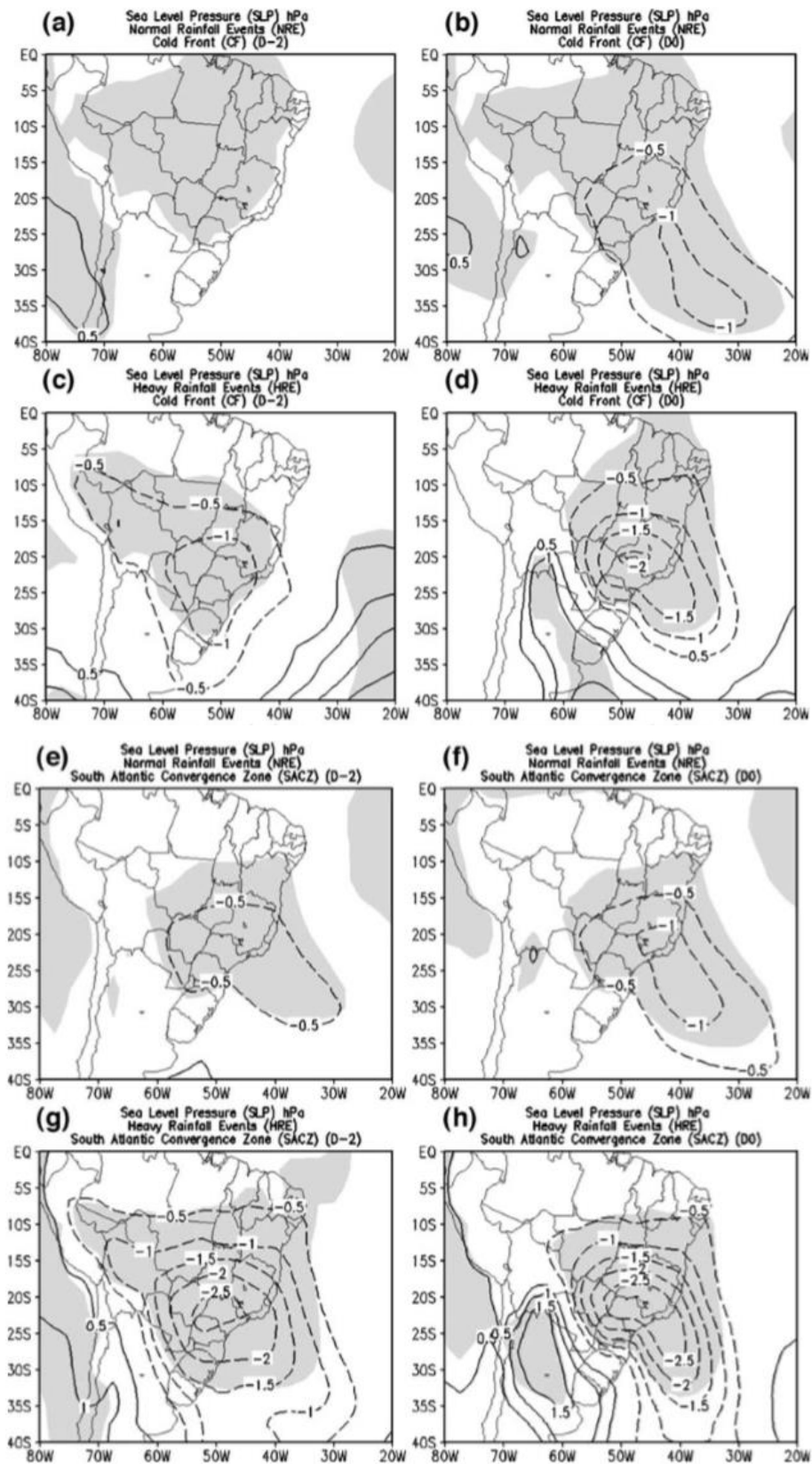


Figura 2.3 – Compostos de anomalia de PNMM, negativa (linha tracejada) e positiva (linha contínua). Caso de chuva normal associada a SF: (a) 2 dias antes (b) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva normal associada a ZCAS (e) 2 dias antes (f) dia em que a ZCAS se forma. Caso de chuva intensa associada a SF: (c) 2 dias antes (d) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva intensa associada a ZCAS: (g) 2 dias antes (h) dia em que a ZCAS se forma. As áreas sombreadas representam significância de 90%. Fonte: Lima *et al.* (2010).

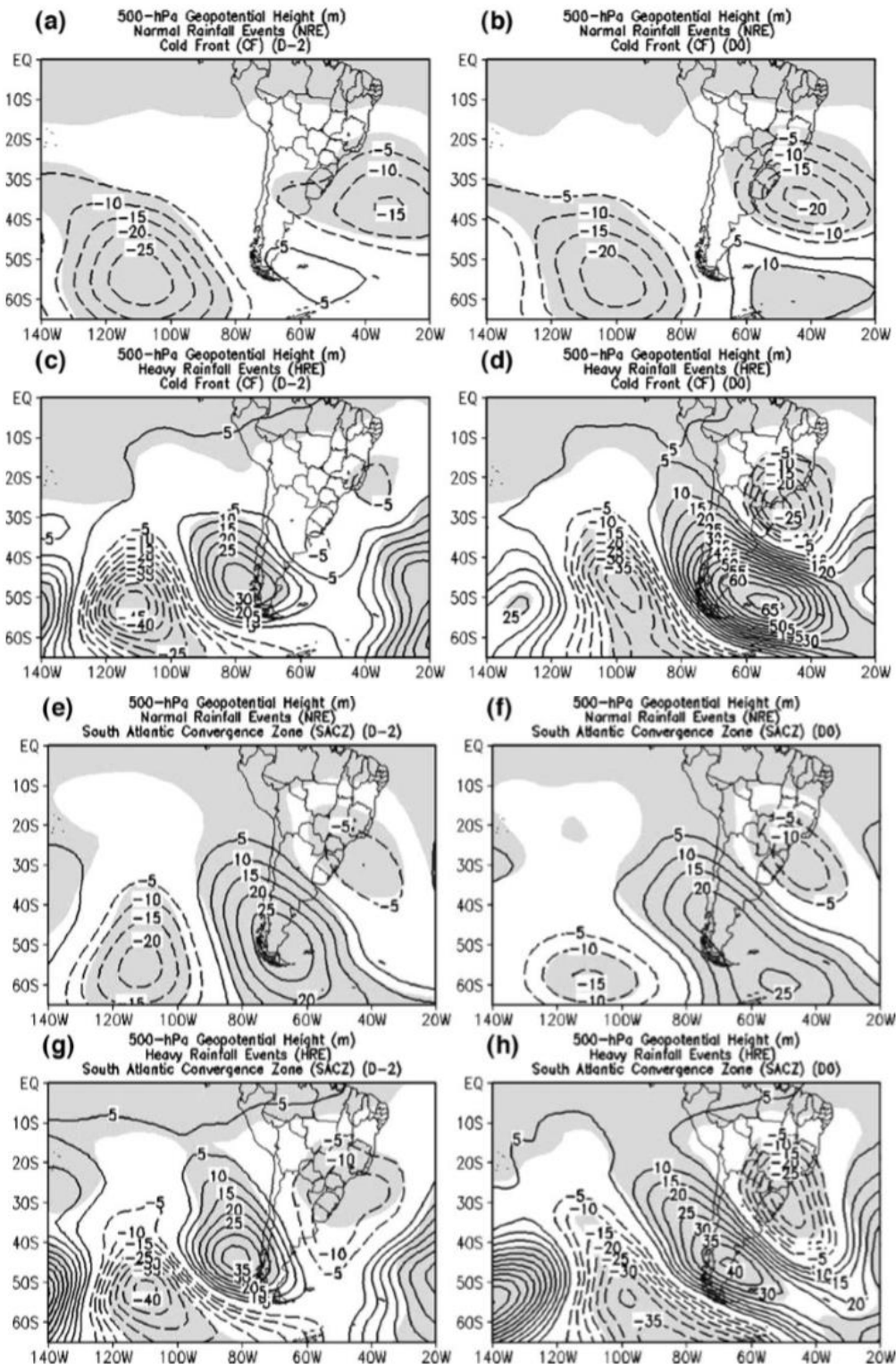


Figura 2.4 – Compostos de anomalia de altura geopotencial em 500 hPa, negativa (linha tracejada) e positiva (linha contínua). Caso de chuva normal associada a SF: (a) 2 dias antes (b) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva normal associada a ZCAS (e) 2 dias antes (f) dia em que a ZCAS se forma. Caso de chuva intensa associada a SF: (c) 2 dias antes (d) dia em que o SF chega a Região Sudeste. Caso de chuva intensa associada a ZCAS: (g) 2 dias antes (h) dia em que a ZCAS se forma. As áreas sombreadas representam significância de 90%. Fonte: Lima *et al.* (2010).



Teixeira e Satyamurty (2007) caracterizaram eventos de chuva intensa sobre a Região Sul do Brasil com o método das isoietas. Um caso de chuva intensa era identificado quando a isoieta de 50 mm/dia abrangia uma área de 10000 km<sup>2</sup> ou superior. Foram identificados 170 casos entre os anos de 1991 e 2001. Na análise dos campos atmosféricos de PNMM e altura geopotencial em 500 hPa, os autores apontam o surgimento e intensificação de um cavado em 500 hPa três dias antes dos casos de chuva intensa. Dois dias antes do caso, configura-se um padrão de escoamento do tipo Jato de Baixos Níveis sobre o Paraguai, intensificando a convergência de umidade sobre norte da Argentina. No dia que antecede o caso de chuva intensa, surge sobre o norte da Argentina um centro de baixa pressão em superfície. Os autores sugerem que a presença de anomalias nos campos citados podem ser indicadores de uma futura ocorrência de chuva intensa. Portanto, eles ressaltam que tal aspecto deve ser melhor explorado visando a melhoria da previsão de tempo.

### 3. Dados e Metodologia

Neste capítulo são detalhados os dados e a metodologia utilizados na execução deste trabalho. Primeiramente são apresentados os dados da Reanálise (*Climate Forecast System Reanalysis - CFSR*) do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) e a precipitação gerada automaticamente pelo produto MERGE e observada nas estações do Sistema Alerta Rio. Em seguida são descritas as fontes e tipos de dados observacionais, as imagens de satélite e o critério utilizado para classificar a intensidade de um evento de precipitação no MRJ.

#### 3.1 Reanálise CFSR

Para construção e análise dos campos meteorológicos foram utilizados os dados de Reanálise (CFSR na versão 2, aqui denominada CFSv2 (Saha *et al.*, 2014). O conjunto de dados CFSR foi escolhido devido ao seu sistema de acoplamento atmosfera-continente-oceano e à sua elevada resolução espacial (0,5° de latitude x 0,5° de longitude). A Reanálise utiliza além de dados observacionais, saídas de modelos atmosféricos. No CFSv2 o modelo de previsão utilizado é o *Global Forecast System* (GFS) com resolução horizontal de 24 km e 64 níveis verticais. O modelo oceânico acoplado no CFSR é o *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model version 4* (Griffies *et al.*, 2004) e o modelo terrestre é o *Noah Land Surface Model* (Ek *et al.*, 2003). Os dados atmosféricos e oceânicos são assimilados separadamente, porém, ambos a cada 6 horas. O método de interpolação é o *Gridpoint Statistical Interpolation*. Diferente das outras reanálises, a componente terrestre é assimilada a cada 24 horas.

Nessa versão do CFSR, os dados de vento à 10 metros de altura, temperatura do ar à 2 metros de altura, aquecimento turbulento e fluxo radiativo não são obtidos de dados observados, mas sim de produtos da previsão atmosférica. Devido à baixa representatividade dos dados de chuva da Reanálise, esses não foram utilizados neste trabalho. As saídas do CFSv2 possuem resolução horizontal de 0,2, 0,5, 1,0, e 2,5° e são feitas 4 análises por dia nos horários padrões: 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC.

Para construção dos campos meteorológicos gerados com o conjunto de dados CFSR, foi usado o *software Grid Analysis and Display System* (GrADS) versão 2.0. Foram combinados diversos campos meteorológicos do CFSR nos níveis 1000, 850, 500, 300 e 250 hPa. Todas as variáveis que compuseram os campos analisados neste trabalho estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Campos meteorológicos analisados e suas respectivas unidades.

Variável	Unidade
Divergência do vento em 1000 hPa	$\times 10^{-5}.s^{-1}$
Ventos nos níveis 1000 e 850 hPa	$m.s^{-1}$
Pressão no nível médio do mar	hPa
Espessura da camada entre 1000 e 500 hPa	mgp
Fluxo de umidade verticalmente integrado na camada entre 1000 e 300 hPa	$kg. m^{-1}.s^{-1}$
Altura geopotencial em 250 hPa	mgp
Linhas de corrente em 250 hPa	-

Para o cálculo do fluxo de umidade verticalmente integrado foi usada a função VINT do GrADS, que considera o seguinte cálculo:

$$\frac{f}{g} \times \sum (expr \times \Delta(level))$$

Onde  $f=100$  e  $g=9,8 m.s^{-2}$  (aceleração da gravidade) são fatores de escala, *expr* é a expressão a ser integrada verticalmente e *Delta (level)* é a diferença entre o nível do topo e da superfície em hPa.

### 3.2 Precipitação Gerada Automaticamente

Os campos de precipitação diária analisados neste trabalho foram gerados por Rozante *et al.* (2010) e denominado pelos autores de MERGE. O produto MERGE trabalha com uma combinação feita com a precipitação observada e as estimativas produzidas por satélite (Rozante *et al.*, 2010). Os dados de precipitação observada utilizados são fornecidos por diferentes fontes como o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e centros regionais. As estimativas da precipitação por satélite utilizadas pelo MERGE são produzidas pelo *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)* (Huffman *et al.*, 2007). O MERGE utiliza o produto

3B42RT cuja resolução temporal é de 3 horas e a resolução horizontal é de 0,25°. Neste trabalho, os campos de precipitação diária foram totalizados às 1200 UTC.

### **3.3 Precipitação Observada**

Para a quantificação da chuva observada sobre o MRJ no período de 24 a 27 de abril de 2011, foram utilizados os dados de chuva acumulada horária e a cada 24 horas nas estações do Sistema Alerta Rio disponibilizados no sítio: <<http://alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/>>. Tal sistema é composto por 33 estações espalhadas pelo município conforme a Figura 1.1.

### **3.4 Diagramas Skew-T e Meteogramas**

No auxílio à identificação do perfil vertical atmosférico sobre o MRJ e para análise das condições de superfície, foram utilizados respectivamente diagramas Skew-T e meteogramas da estação SBGL localizado no Aeroporto Internacional do Galeão disponíveis em <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>> e <<http://weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/samerica.shtml>>.

### **3.5 Imagens de Satélite**

As imagens do satélite Meteosat-9 e GOES-12 utilizadas na análise das condições atmosféricas no período de estudo estão disponíveis no sítio da Divisão de Satélites e Sistema Ambientas (DSA) (CPTEC/INPE): <<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/>>. O canal do satélite Meteosat-9 analisado foi o infravermelho com temperatura de topo das nuvens (SPW) em 10,8 µm. O canal do satélite GOES-12 utilizado foi “T Realçada” (infravermelho com temperatura de topo das nuvens).

### **3.6 Critérios para a Identificação de Chuva Intensa a Muito Intensa**

O critério utilizado na classificação de eventos de chuva intensa foi estabelecido por Pristo *et al.* (2018) com base nos percentis 75, 90, 95 e 99 de chuva acumulada em 15 minutos e em 24 horas para cada posto pluviométrico do Sistema Alerta Rio. Dessa forma, a precipitação é classificada em cinco classes: fraca, moderada, moderadamente intensa, intensa e muito intensa. Para o posto pluviométrico da Tijuca, os valores de tais

limiares são apresentados na Tabela 3.2. Os limiares das demais estações do Alerta Rio podem ser consultados na “Tabela 2” de Pristo *et al.* (2018).

Tabela 3.2 – Limiares utilizados para classificação de chuva fraca, moderada, moderadamente intensa, intensa e muito intensa na Tijuca. Fonte: Pristo *et al.* (2018).

<b>Tijuca</b>	<b>Fraca</b> < percentil 75	<b>Moderada</b> ≥ percentil 75 e < percentil 90	<b>Moderadamente intensa</b> ≥ percentil 90 e < percentil 95	<b>Intensa</b> ≥ percentil 95 e < percentil 99	<b>Muito intensa</b> ≥ percentil 99
Chuva 15 min.	< 0,8	0,8 – 1,8	1,8 - 3,0	3,0 – 7,9	≥ 7,9
Chuva 24h.	< 12,6	31,4 – 46,3	31,4 – 46,3	46,3 – 92,0	≥ 92,0

## 4. Resultados

Neste capítulo elabora-se uma análise sinótica do evento de chuva intensa ocorrido no MRJ entre os dias 24 e 26 de abril de 2011. Na primeira seção encontra-se uma análise da chuva observada. Na segunda seção é feita uma análise das imagens de satélite e dos dados observacionais coletados no MRJ. A terceira seção traz uma análise sinótica da atmosfera desde a superfície até níveis altos, a partir dos dados da Reanálise CFSR. Na última seção é feita uma síntese de toda a análise apresentada neste capítulo.

### 4.1 Chuva Observada

A Figura 4.1 apresenta a chuva acumulada em 24 horas obtida pelo MERGE das 1200 UTC do dia 24/04 até 1200 UTC do dia 25/04 (Figura 4.1a) e das 1200 UTC do dia 25/04 até as 1200 UTC do dia 26/04.

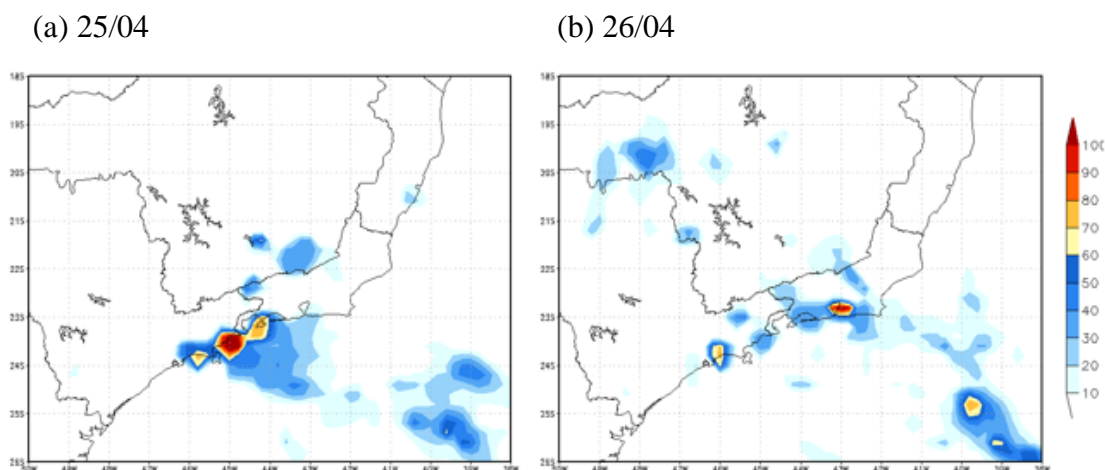


Figura 4.1 – Chuva ( $\text{mm. dia}^{-1}$ ), obtida do MERGE, das 1200 UTC do dia anterior até as 1200 UTC do dia em questão para: (a) 25/04/2011 e (b) 26/04/2011.

Nota-se na Figura 4.1 nos dias 25/04 e 26/04 núcleos de chuva próximos e sobre o município do Rio de Janeiro. No dia 25/04, o núcleo próximo ao MRJ chega a atingir valores acima de  $70 \text{ mm.dia}^{-1}$  e no dia 26/06, o núcleo sobre a cidade chega a exibir valores maiores que  $100 \text{ mm.dia}^{-1}$ . Em ambos os dias, os núcleos de chuva estão embebidos em um sistema maior que se estende até o oceano Atlântico. No dia 27/04 (figura não exibida), o produto MERGE detectou pontos com acumulados inferiores a  $20 \text{ mm.dia}^{-1}$  sobre a cidade, indicando o enfraquecimento do sistema sobre a região.

A Figura 4.2, elaborada com os dados do Sistema Alerta Rio, mostra a chuva acumulada em 24 horas em cada estação no dia 26/04 às 1200 UTC. Também são apresentados os acumulados diários coletados às 1200 UTC do dia 25/04 nessas estações.

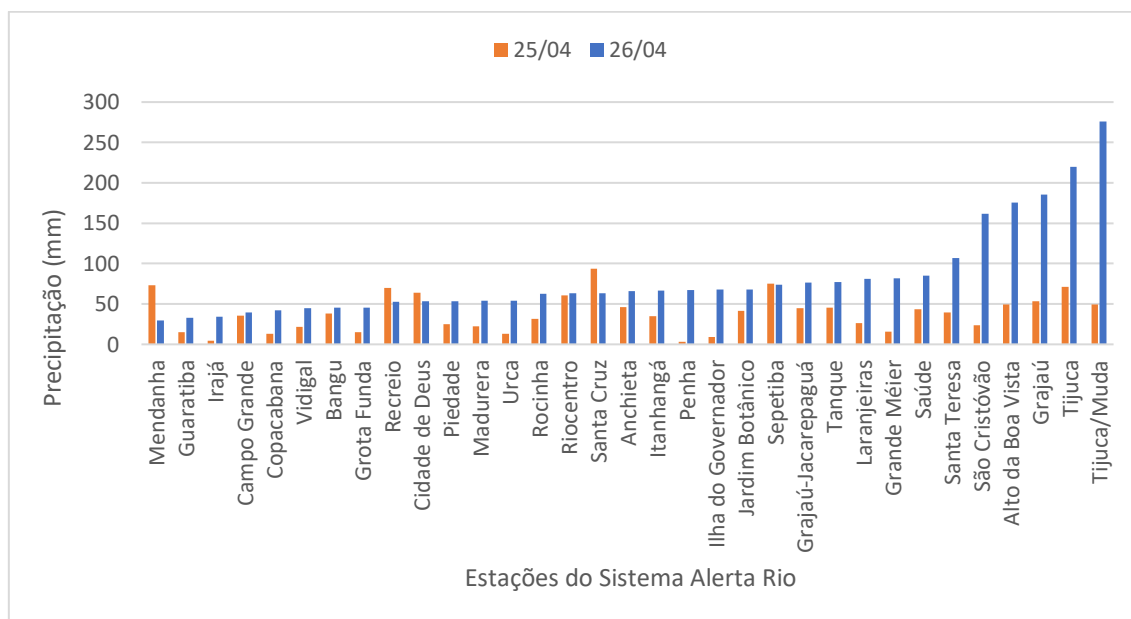


Figura 4.2 - Chuva acumulada em 24 horas ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), nas estações do Sistema Alerta Rio das 1200 UTC do dia anterior até as 1200 UTC do dia em questão para os dias 25/04/2011 e 26/04/2011.

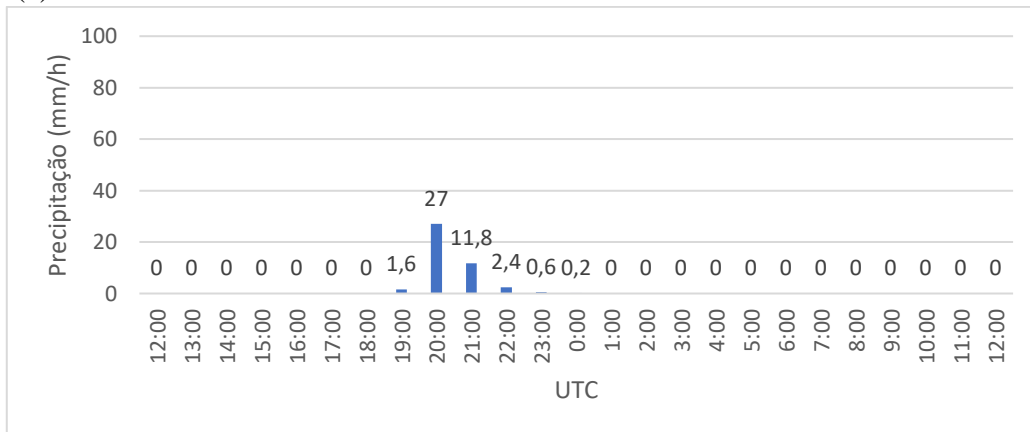
Com exceção das estações Mendanha, Recreio, Cidade de Deus, Santa Cruz e Sepetiba, todas as estações registraram maiores acumulados no dia 26/04 do que no dia 25/04. Ao todo, 19 das 33 estações apresentaram chuva intensa no dia 26/04 e outras 13 estações apresentaram chuva muito intensa nesse dia, segundo os limiares propostos por Pristo *et al.* (2018). Seis estações mostraram acumulados acima de  $100 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ . Em Santa Teresa, São Cristóvão, Alto da Boa Vista e Grajaú foram acumulados respectivamente 107,2, 162,0 175,8 e 185,4  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ . As estações Tijuca e Tijuca/Muda registraram 219,0 e 276,0  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  respectivamente.

A Figura 4.3 apresenta a evolução horária da chuva acumulada nos dias 24/04, 25/04, 26/04 e 27/04 na estação Tijuca/Muda, onde foi registrado, no dia 26/04, o maior acumulado dentre todas as estações. No dia 24/04 (Figura 4.3a), às 1900 UTC, a chuva tem início, acumulando 1,6 mm nesse horário. Às 2000 UTC o valor chega a 27,0 mm. Após esse horário, a chuva diminui e cessa às 0100 UTC. Na Figura 4.3b, é possível notar ausência de precipitação até o início da noite (2300 UTC) do dia 25/04. A partir desse horário (2300 UTC), tem início a precipitação mais intensa do caso estudado. A

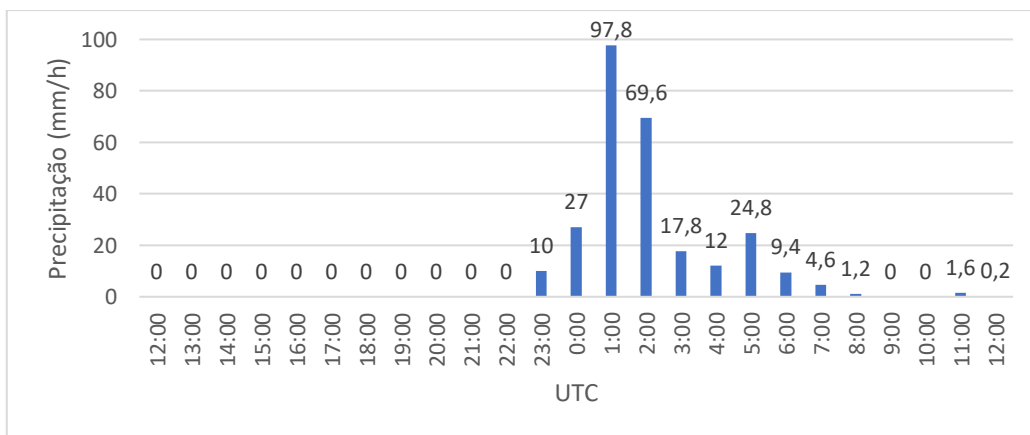
chuva aumenta muito rapidamente chegando a 97,8 mm às 0100 UTC do dia 26/04. Após 0200 UTC do dia 26/04, ocorre relativa diminuição da precipitação até aproximadamente 0400 UTC. Às 0500 UTC do dia 26/04, a chuva volta a aumentar chegando a 24,8 mm. Após as 0700 UTC do dia 26/04, a chuva tem caráter fraco e intermitente que continua ocorrendo durante o período da tarde e noite do dia 26/04 e madrugada e manhã do dia 27/04, apresentando acumulado horário máximo de 4,6 mm às 2000 UTC do dia 26/04 (Figura 4.3c).



(a) 25/04



(b) 26/04



(c) 27/04

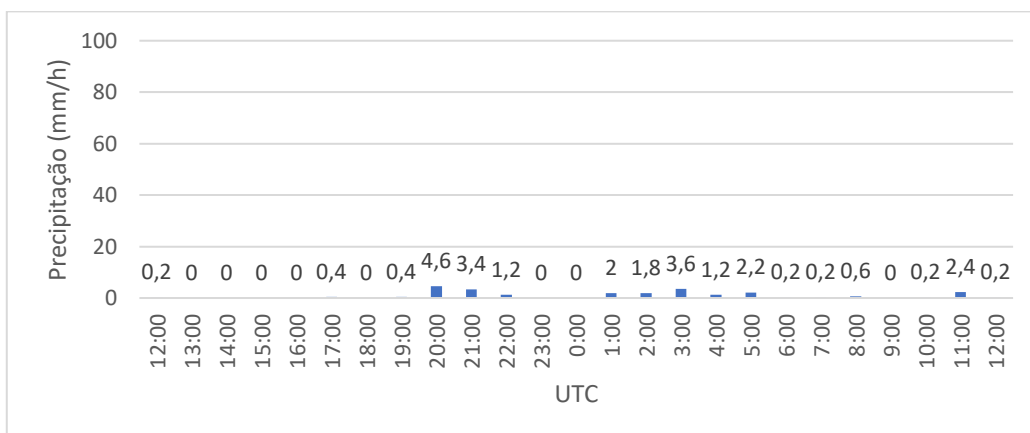


Figura 4.3 – Chuva horária (mm/h) na estação Tijuca/Muda das 1200 UTC do dia anterior até as 1200 UTC do dia em questão para os dias: (a) 25/04/2011 (b) 26/04/2011 e (c) 27/04/2011.

Utilizando a equação geral de intensidade-duração-frequência (IDF- Equação 4.1) de chuvas, com os coeficientes propostos por Braga *et al.* (2017) para os postos do Sistema Alerta Rio, é possível encontrar o período de retorno para uma chuva como essa (97,8 mm/h) ocorrida na estação Tijuca/Muda.

$$I = \frac{K \cdot T_r^m}{(t + t_0)^n} \quad (4.1)$$

Onde:

I = intensidade da precipitação (mm/h);

Tr = tempo de retorno (anos);

t = duração da precipitação (minutos);

K, m, t<sub>0</sub>, n = Coeficientes (adimensionais) da equação que descrevem características locais.

Para a estação Tijuca, utilizando os valores dos coeficientes dispostos na Tabela 1 de Braga *et al.* (2017), ou seja, K=712,39; m=0,21; t<sub>0</sub>=15,48 e n=0,64 e considerando I=97,8 mm/h, obtém-se Tr = 41,3 anos. Isso significa que um acumulado de 97,8 mm/h ocorre em média a cada 41 anos.

## 4.2. Análise das Imagens de Satélite e Dados Observacionais

Segundo a Revista Climanálise do CPTEC/INPE de abril de 2011, o sistema frontal em questão, quinto e último do mês, penetrou no Rio Grande do Sul no dia 23/04 e na madrugada do dia 24/04 avançou sobre o Paraná, chegando a Região Sudeste no decorrer desse dia.

A Figura 4.4 mostra as imagens do satélite Meteosat-9 no canal infravermelho (IV) no período de 24/04/2011 a 26/04/2011. Na Figura 4.4a (0000 UTC 24/04), observa-se a banda de nebulosidade, associada ao SF, se estendendo desde o sul da Bolívia até o Atlântico passando sobre o Rio Grande do Sul, Paraná e São Paulo. Na Figura 4.4b, às 1200 UTC do dia 24/04, nota-se que o SF avança sobre o oceano localizando-se próximo ao litoral do Rio de Janeiro. Observa-se também uma interação entre o SF e a massa equatorial amazônica, organizando a convecção sobre o sul do Mato Grosso, o sul de Goiás e o norte do Mato Grosso do Sul. Às 1800 UTC do dia 24/04 (Figura 4.4c), núcleos

de precipitação com temperatura de topo inferior a  $-60^{\circ}\text{C}$  são observados sobre o MRJ e litoral. Nesse horário observa-se o início da chuva sobre o MRJ.

No dia 25/04 às 0000 UTC (Figura 4.4d), ou seja, às 21:00 h local do dia 24/04, o SF permanece atuando no MRJ. Na Figura 4.4e, às 1200 UTC do dia 25/04, observa-se que o SF se afasta do continente, atuando com maior intensidade sobre o oceano. A seguir, no horário de 2300 UTC do dia 25/04 (Figura 4.4f), nota-se um aumento de nebulosidade no MRJ, característico de um reforço de perturbação em escala sinótica, que será melhor descrito posteriormente na Seção 4.3. Nesse horário começa a chover novamente sobre o MRJ. Na noite desse dia (25/04) ocorre a precipitação mais intensa observada durante o caso estudado. Pode-se notar também, aumento na convecção sobre São Paulo e fronteira com Minas Gerais, sobre o norte do Paraná e leste do Mato Grosso do Sul.

Na Figura 4.4 (g), (h) e (i), as imagens do satélite Meteosat-9 apresentam a atuação do SF na noite do dia 25/04 e na madrugada do dia 26/04. Nos horários apresentados ocorreu sobre o MRJ chuva muito intensa. De acordo com a Figura 4.4g, na noite do dia 25/04, o SF que anteriormente encontrava-se mais intenso sobre o oceano e menos intenso sobre o continente, volta a atuar sobre o MRJ sendo observados núcleos convectivos sobre a região durante todo o período da noite do dia 25/04 e madrugada do dia 26/04. Na Figura 4.4i, o SF atuante encontra-se melhor organizado sobre a Região Sudeste, se comparado aos dias anteriores.

Às 1200 UTC do dia 26/04 (Figura 4.4j), o SF avança sobre o oceano, gerando nebulosidade sobre São Paulo, Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais. Existem poucos pontos com temperatura de topo das nuvens abaixo de  $-30^{\circ}\text{C}$ , o que significa pouco crescimento vertical das nuvens, ou seja, redução da nebulosidade convectiva. A nebulosidade estratiforme também presente no MRJ ocasiona a chuva fraca e intermitente nesse dia. Na Figura 4.4k, o SF avança ainda mais sobre o mar sendo seu sinal observado somente sobre o Rio de Janeiro e na fronteira entre São Paulo e Minas Gerais. Na noite do dia 26/04 (Figura 4.4l), o SF afasta-se do continente onde permanecem atuando áreas de instabilidade formadas por nuvens rasas sobre Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais.

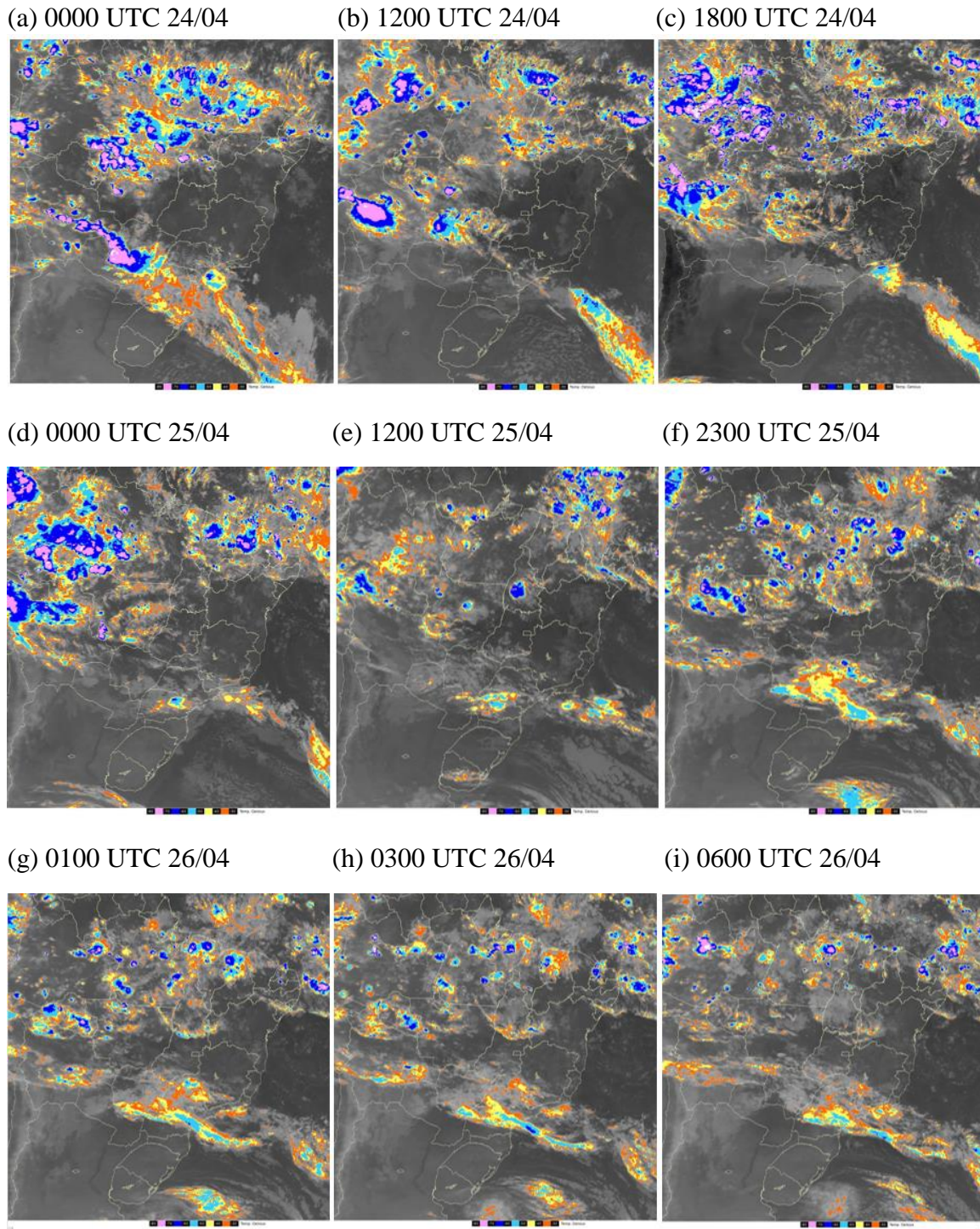


Figura 4.4 – Imagens do satélite Meteosat-9 no canal infravermelho (IV) ( $10,8 \mu\text{m}$ ) com temperatura de topo das nuvens ( $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 0000 UTC 24/04, (b) 1200 UTC 24/04, (c) 1800 UTC 24/04, (d) 0000 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 2300 UTC 25/04, (g) 0100 UTC 26/04, (h) 0300 UTC 26/04, (i) 0600 UTC 26/04, (j) 1200 UTC 26/04, (k) 1800 UTC 26/04 e (l) 0000 UTC 27/04. Fonte: CPTEC/INPE.

(j) 1200 UTC 26/04

(k) 1800 UTC 26/04

(l) 0000 UTC 27/04

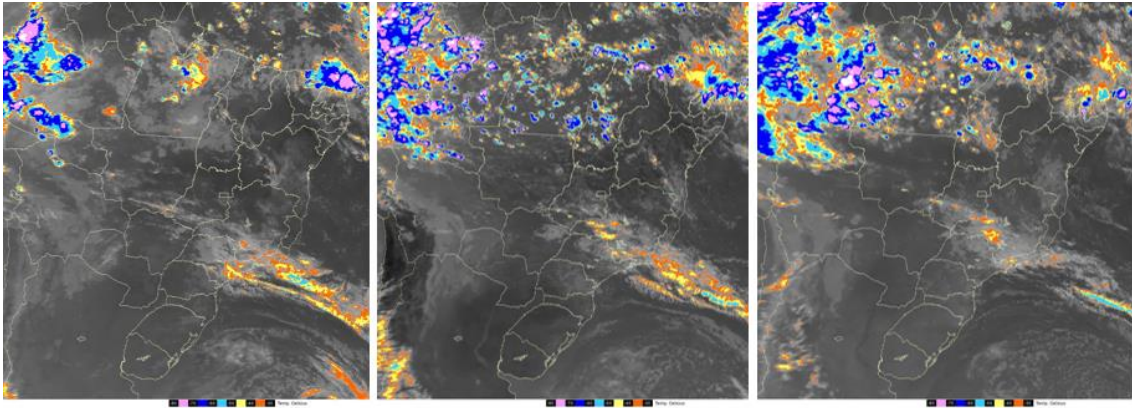


Figura 4.4 – Final.

Nota-se, portanto, que a chuva que ocorreu na tarde do dia 24/04 foi provocada pela passagem do último sistema frontal do mês de abril de 2011 pelo Brasil. A seguir, a precipitação enfraquece devido ao afastamento do SF sobre o continente, mas retorna na noite do dia 25/04, com forte intensidade.

A Figura 4.5 apresenta imagens do satélite GOES-12 na noite do dia 25/04/2011. Os horários apresentados são próximos ao horário da ocorrência da chuva muito intensa sobre o MRJ: 0000, 0100 e 0200 UTC do dia 26/04, ou seja, 21:00, 22:00 e 23:00 h local do dia 25/04. Pode-se notar a presença de aglomerados convectivos sobre o município nos três horários, assim como uma significativa ondulação no SF sobre o Atlântico, próximo ao litoral de São Paulo. Isso indica que, provavelmente, a chuva observada na noite do dia 25/04 estava associada a um sistema convectivo de escala inferior à escala sinótica, embebido no sistema frontal que se encontrava sobre a região de estudo.

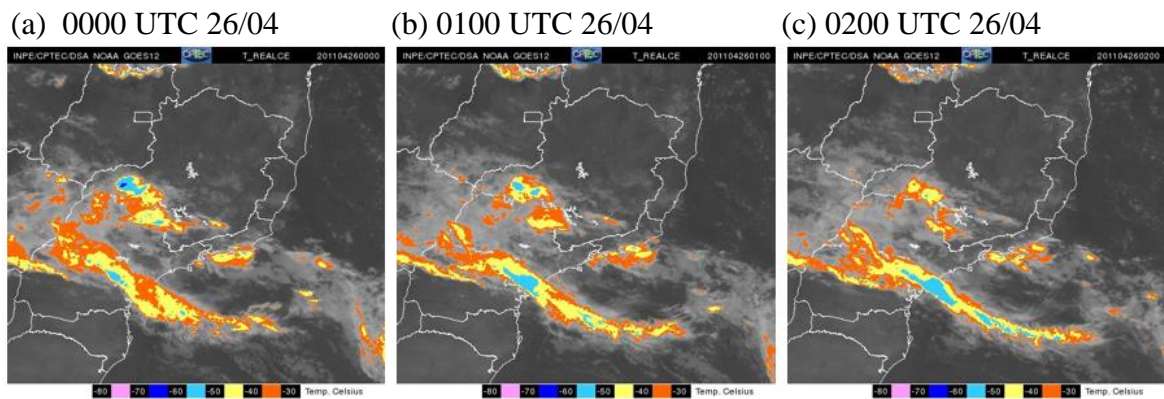


Figura 4.5 – Imagens do satélite GOES-12 no canal do infravermelho com temperatura de topo das nuvens (°C) no dia 26/04/2011: (a) 0000 UTC, (b) 0100 UTC e (d) 0200 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

Na Figura 4.6 encontra-se o meteograma produzido com dados de METAR da estação SBGL do período de 0600 UTC do dia 25/04 até as 0600 UTC do dia 26/04. Nessa figura são apresentadas as séries velocidade e direção do vento, visibilidade horizontal, cobertura total do céu, cobertura do céu nas alturas onde se encontram as nuvens baixas, médias e altas e pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM). Apesar da passagem do SF no dia 24 (figura não apresentada), predominam ventos de quadrante norte na manhã do dia 25/04. A partir da tarde do dia 25/04, o vento ronda para sul, aumentando sua intensidade. Observa-se trovoadas a partir da noite desse dia, acompanhadas por chuva e redução da visibilidade, até a madrugada do dia 26/04. Na curva da pressão atmosférica nota-se uma forte redução (3 hPa) entre 1500 UTC e 1700 UTC do dia 25/04 e a seguir um forte aumento (4 hPa) entre 1900 UTC do dia 25/04 e 0000 UTC do dia 26/04, indicando provavelmente a passagem de algum distúrbio de mesoescala.

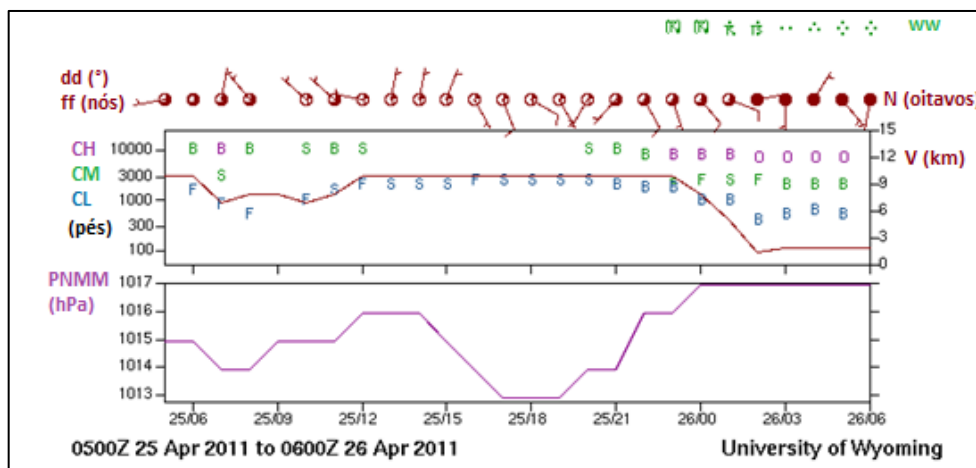


Figura 4.6 – Meteograma gerado com dados METAR da estação SBGL das 0600 UTC do dia 25/04 até as 0600 UTC do dia 26/04. Fonte: Modificado de *University of Wyoming*.

A Figura 4.7 apresenta os diagramas Skew-T da estação SBGL às 1200 UTC do dia 25/04 (Figura 4.7a) e às 0000 UTC do dia 26/04 (Figura 4.7b). Segundo os limites típicos considerados por Nascimento (2005), na Figura 4.7a os índices K ( $KINX=31,10^{\circ}C$ ) e TT ( $TOTL=42,80^{\circ}C$ ) apresentam alto potencial de formação de tempestades. Contudo, o valor de CAPE de  $506,5 J.kg^{-1}$  está muito abaixo do valor de  $1000 J.kg^{-1}$  e LI ( $LIFT=-0,79^{\circ}C$ ) é muito superior à  $-5^{\circ}C$ , valores considerados como de alto potencial para tempestades severas. Analisando o comportamento vertical da temperatura do ar e da temperatura do ponto de orvalho, é possível notar que a atmosfera se encontrava mais úmida até o nível isobárico de 700 hPa. Acima desse nível, ocorre afastamento entre as curvas de temperaturas do ar e da temperatura do ponto de orvalho, representando diminuição de umidade, provavelmente associado ao movimento subsidente nessa camada. O perfil atmosférico analisado é considerado favorável à formação de tempestades severas.

Na Figura 4.7b, o perfil atmosférico às 0000 UTC de 26/04 é semelhante ao apresentado anteriormente. Os valores dos índices K ( $KINX=34,70^{\circ}C$ ) e TT ( $TOTL=48,70^{\circ}C$ ) são classificados como de alto potencial para formação de tempestades. Porém, diferentemente do perfil anterior, a CAPE na noite do dia 25/04 pode ser classificada como de alto potencial para a formação de tempestades, pois excede o valor de  $1000 J.kg^{-1}$ . Nota-se a proximidade entre os perfis verticais de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, indicando que a atmosfera se encontrava quase saturada desde a superfície até, aproximadamente, o nível isobárico de 750 hPa. Na camada entre os níveis de 750 e 500 hPa ocorre um secamento devido a uma incursão de ar mais frio.

Acima de 500 hPa, os perfis de temperatura se afastam ainda mais. Também é possível notar que nos primeiros níveis o vento observado era predominantemente de sul. Características como essas foram encontradas por Andrade *et al.* (2015) em seu estudo sobre os padrões sinóticos observados em eventos de chuva intensa no Rio de Janeiro.

(a) 1200 UTC 25/04

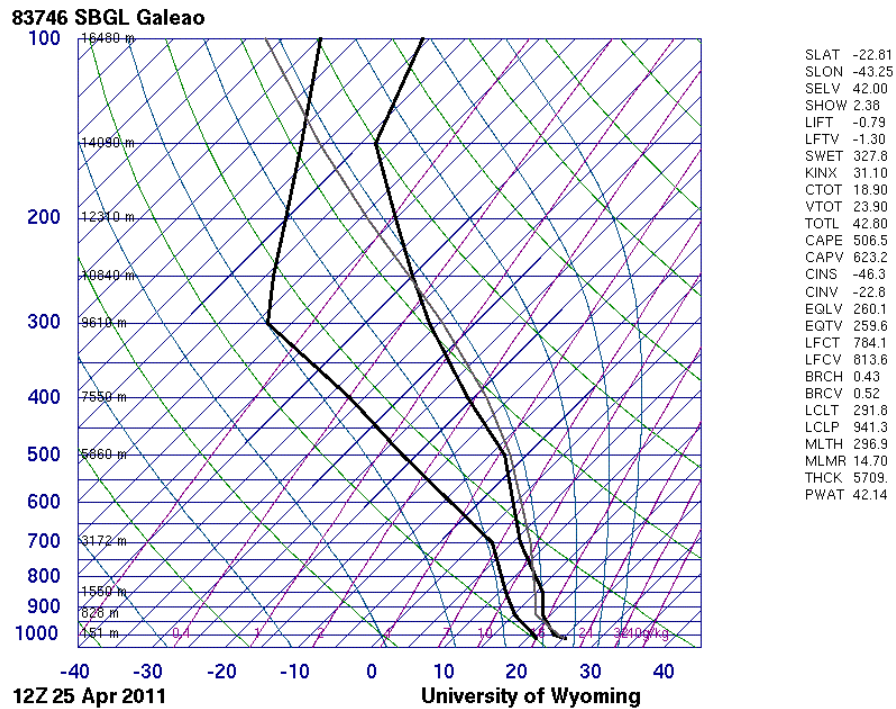


Figura 4.7 – Diagramas Skew-T da SBGL às: (a) 1200 UTC 25/04 e (b) 0000 UTC 26/04. Fonte: Modificado de *University of Wyoming*.



(b) 0000 UTC 26/04

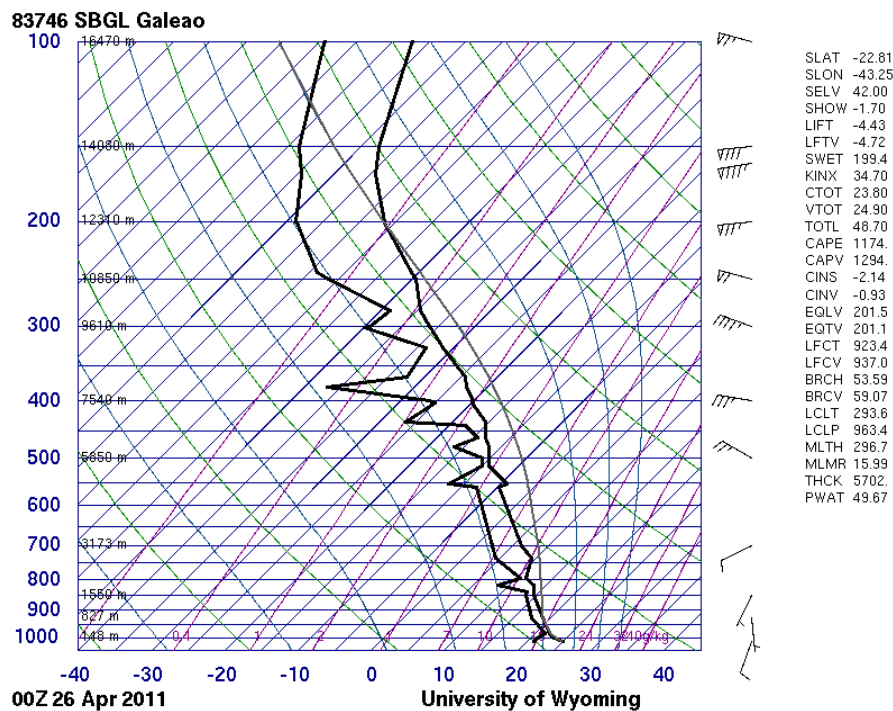


Figura 4.7 – Final.

### 4.3 Análise Sinótica

Os campos de PNMM e vento em 850 hPa são exibidos na Figura 4.8. Na Figura 4.8a (1200 UTC do dia 24/04) nota-se a presença de um cavado (segmento de reta vermelho) sobre o oceano estendendo-se até o litoral da Região Sudeste, dando suporte ao SF. Esse cavado está associado a um ciclone com núcleo de inferior a 980 hPa em, aproximadamente, 45°S/40°W (círculo vermelho). Sobre o litoral da Região Sudeste os ventos em 850 hPa tem direção predominante de sul. Nota-se também a presença de um anticiclone com núcleo em 30°S/55°W e pressão atmosférica de 1020 hPa na retaguarda do SF. Na Figura 4.8b, o SF avança sobre o oceano afastando-se do litoral da Região Sudeste. No dia 25/04 às 0000 UTC (Figura 4.8c) e às 0600 UTC (Figura 4.8d), o cavado enfraquece, perde amplitude e afasta-se ainda mais do litoral do país. Nesses horários atua sobre o MRJ e adjacências, um anticiclone pós-frontal. Observa-se também, na Figura 4.8c, um segundo cavado (segmento de reta vermelho) sobre o oceano posicionado a oeste do cavado apresentado anteriormente. Esse cavado começa a ganhar amplitude às 0600 UTC do dia 25/04.

Na Figura 4.8e, às 1200 UTC do dia 25/04, esse segundo cavado posicionado entre as longitudes 50°W e 25°W, ganha ainda mais amplitude e se move sobre o oceano para leste de sua posição inicial. Às 1800 UTC do dia 25/04 (Figura 4.8f), o cavado continua a ganhar amplitude e a mover-se para leste, sendo seus efeitos observados no litoral da Região Sudeste com a presença de ventos de quadrante sul. Na noite do dia 25/04 (Figura 4.8g), o cavado posiciona-se entre 45°W e 20°W. Sobre o MRJ observa-se ventos com direção predominante de sul. Na Figura 4.8h (madrugada do dia 26), os ventos de sul permanecem atuando sobre o Rio de Janeiro e o cavado continua a se deslocar para leste.

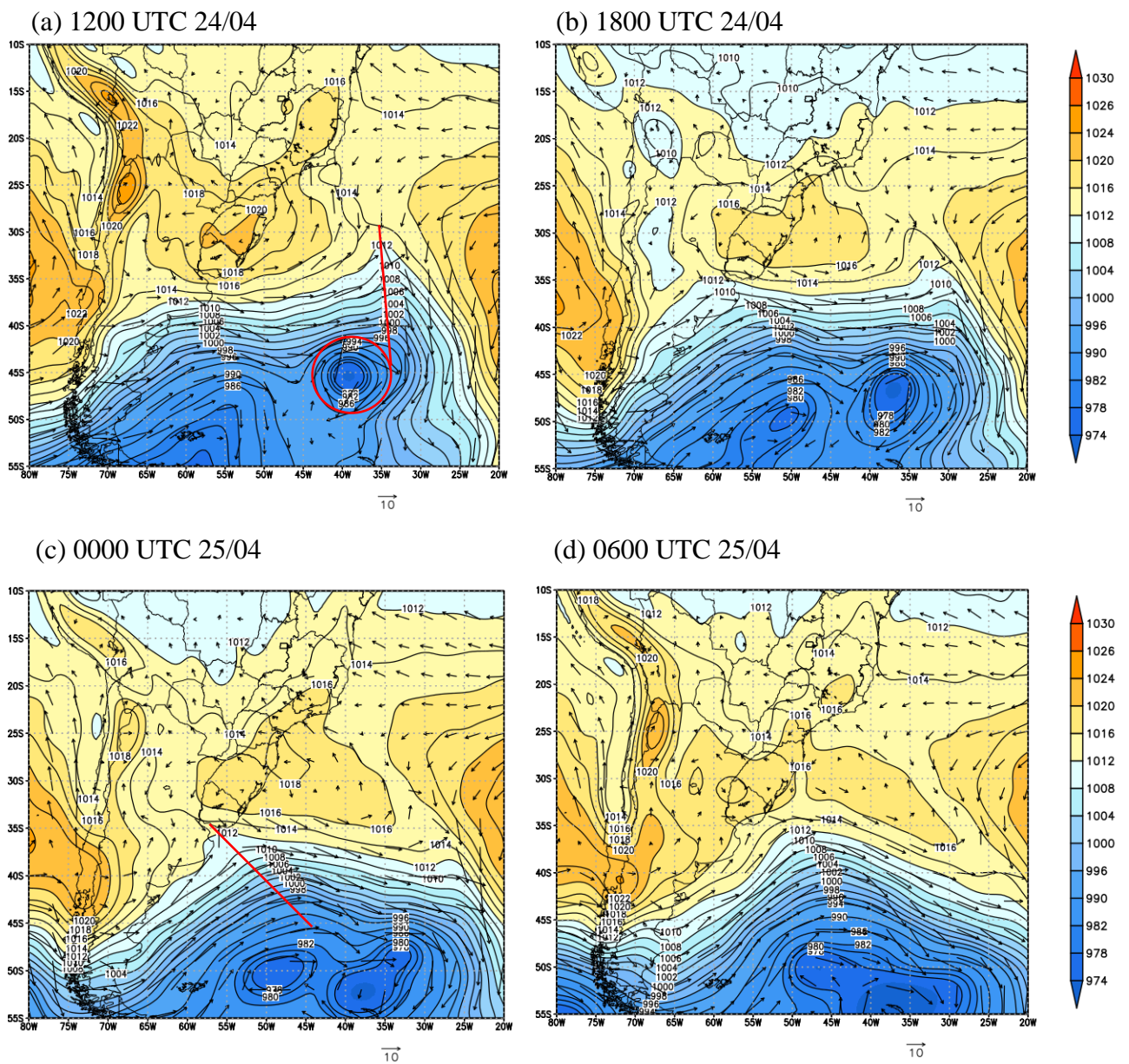
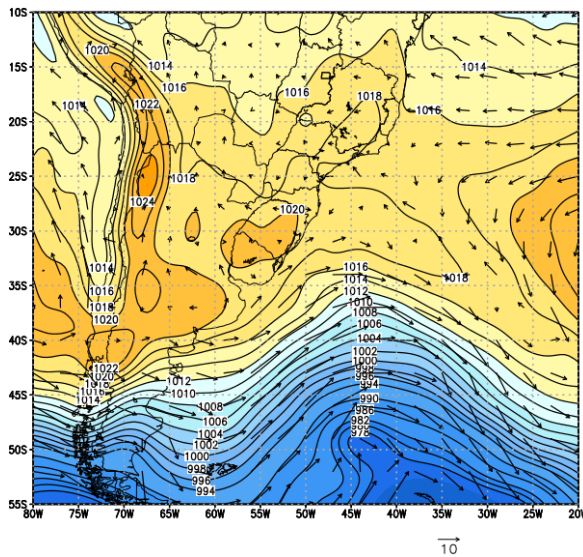
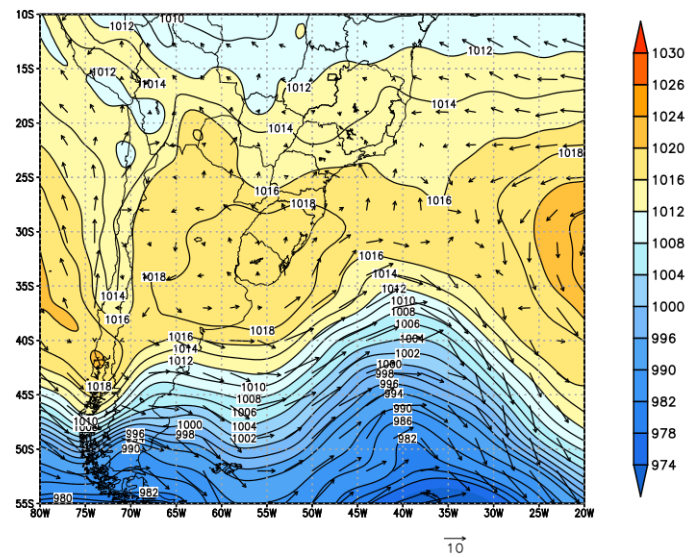


Figura 4.8 - PNMM (linha a cada 2 hPa e sombreado) e vento em 850 hPa ( $m.s^{-1}$ ) (vetor): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.

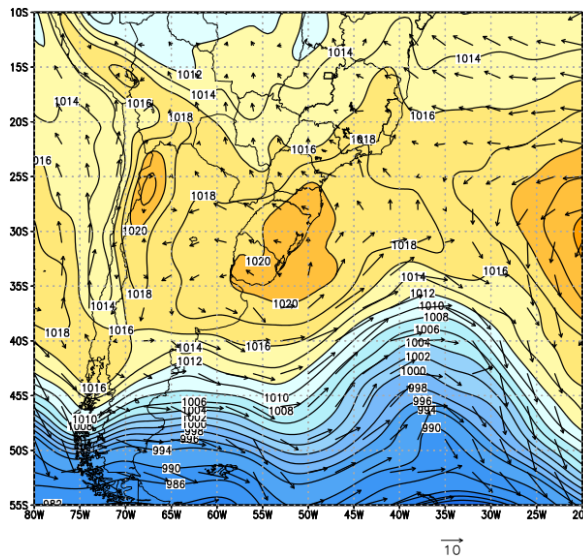
(e) 1200 UTC 25/04



(f) 1800 UTC 25/04



(g) 0000 UTC 26/04



(h) 0600 UTC 26/04

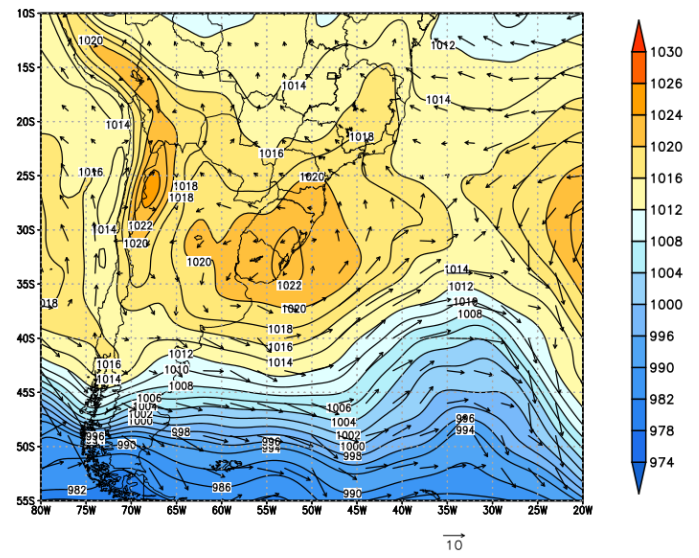


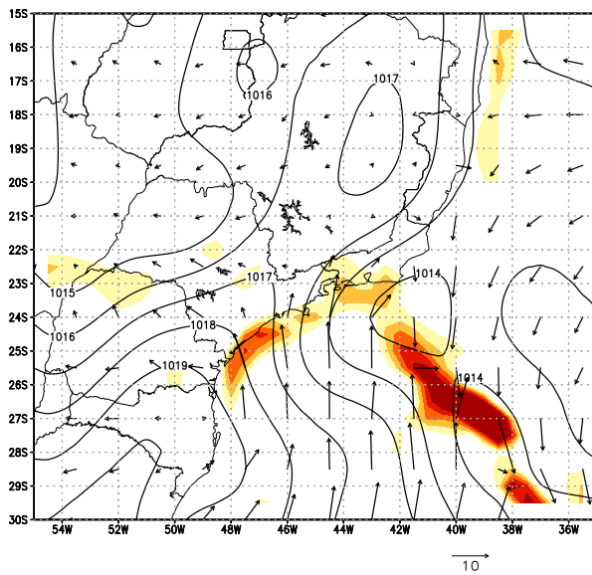
Figura 4.8 – Final.

A Figura 4.9 apresenta os campos de vento e de sua divergência em 1000 hPa. Divergência negativa do vento na superfície significa convergência nesse nível e, conseqüentemente, movimento ascendente nas primeiras camadas da atmosfera. Na Figura 4.9a, às 1200 UTC do dia 24/04, observa-se sobre o MRJ, convergência do vento com valores entre  $-2 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$  e  $-6 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$  e vento predominantemente de sul com velocidade acima de  $10 \text{ m} \cdot s^{-1}$ . Essa convergência ocorre devido à chegada do SF sobre a região nesse dia. No horário seguinte do dia 24/04 (Figura 4.9b) e às 0000 UTC do dia 25/04 (Figura 4.9c), a convergência e o vento de quadrante sul persistem sobre o MRJ

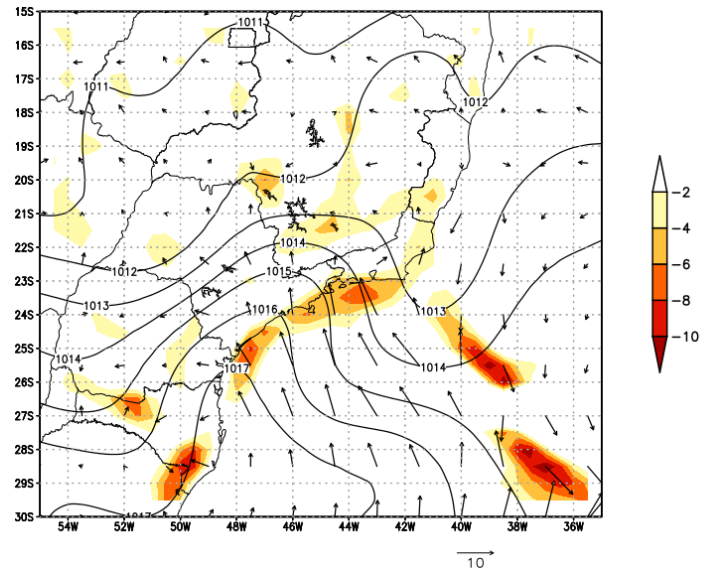
estando ainda associadas a atuação do SF. Contudo, às 0000 UTC do dia 25/04, ocorre uma notável redução na velocidade do vento em 1000 hPa sobre o MRJ e litoral.

Às 0600 UTC do dia 25/04 (Figura 4.9d), devido à atuação do anticiclone pós-frontal, não se nota convergência significativa do vento sobre o MRJ e sua velocidade é ainda mais reduzida. Também não se nota convergência acentuada às 1200 UTC do dia 25/04 (Figura 4.9e). Na Figura 4.9f, às 1800 UTC do dia 25/04, pode-se notar uma região de convergência do vento sobre o MRJ que permanece atuando sobre a cidade até 0600 UTC do dia 26/04. Nesse horário (1800 UTC) também ocorre ligeiro aumento na velocidade do vento próximo ao litoral. Às 0000 UTC e às 0600 UTC do dia 26/04, a velocidade do vento continua a aumentar mantendo direção predominante de sul devido à aproximação do centro do anticiclone pós-frontal sobre a Região Sul. Logo, pode-se concluir que existia uma persistente convergência do vento e escoamento de quadrante sul na superfície na tarde e noite do dia 25/04 e madrugada do dia 26/04. Tal convergência corrobora com a instabilidade atmosférica causadora da chuva intensa observada. O vento predominante de sul, advecta ar úmido do oceano em direção ao continente, favorecendo o transporte de umidade para o MRJ.

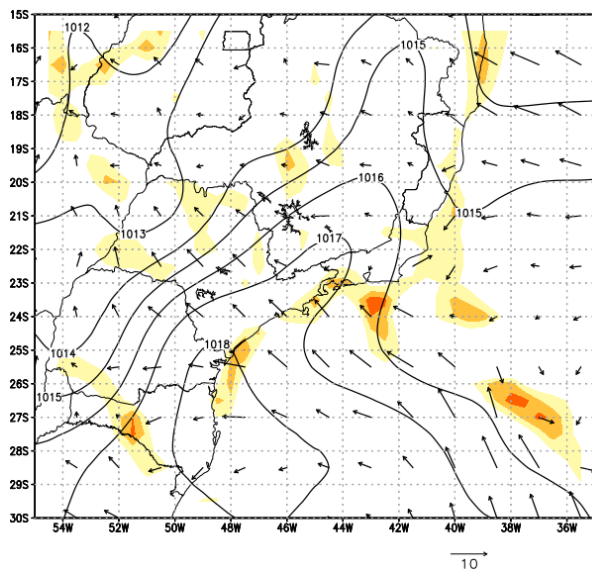
(a) 1200 UTC 24/04



(b) 1800 UTC 24/04



(c) 0000 UTC 25/04



(d) 0600 UTC 25/04

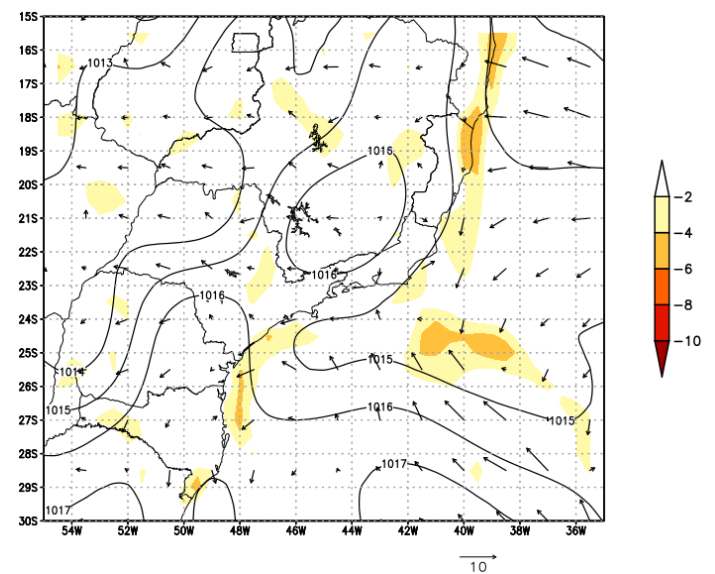


Figura 4.9 – Vento ( $m.s^{-1}$ ) (vetor), Divergência do vento em 1000 hPa ( $\times 10^{-5}. s^{-1}$ ) (sombreado) e pressão ao nível médio do mar (linhas a cada 1 hPa): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.

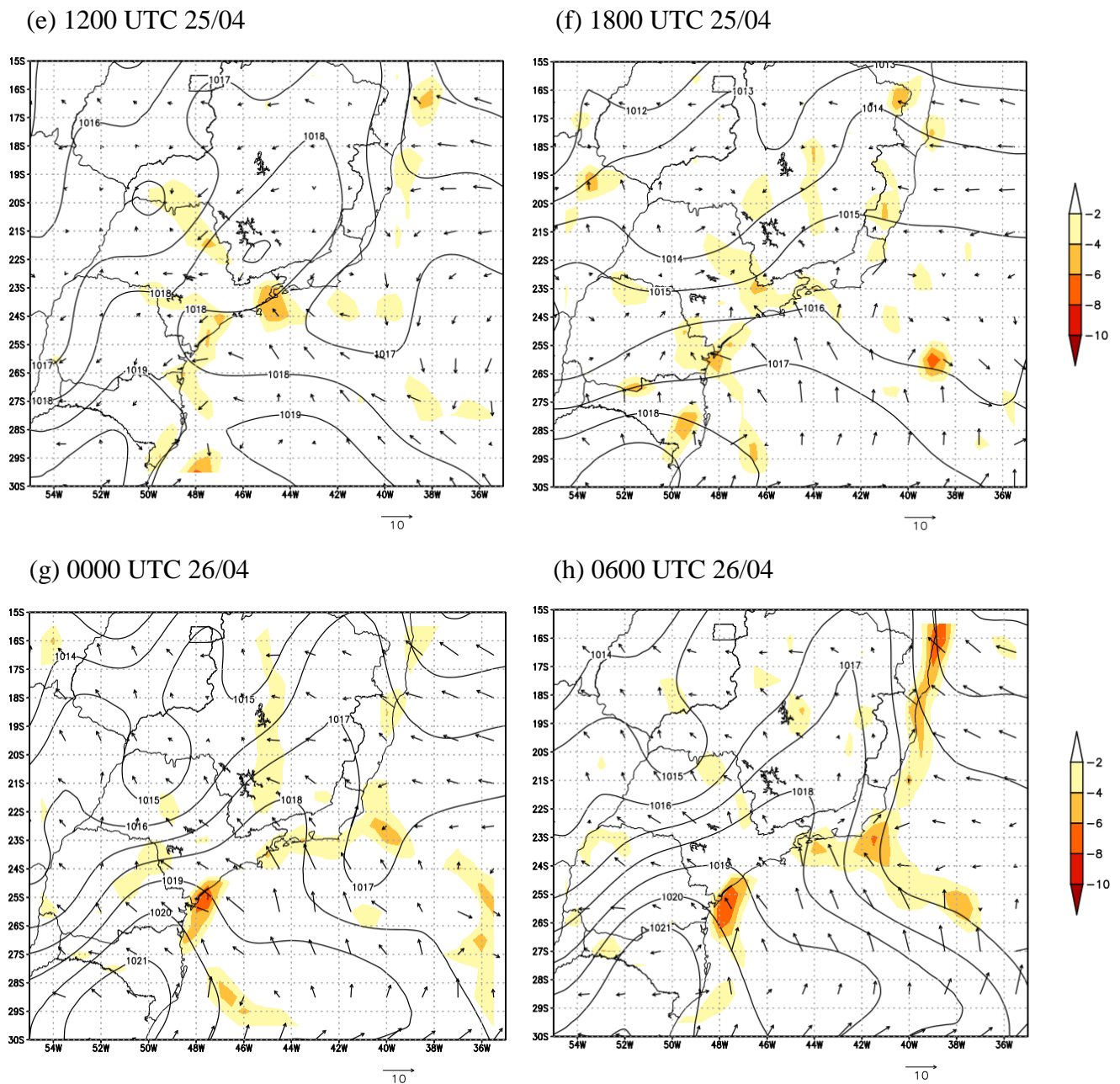
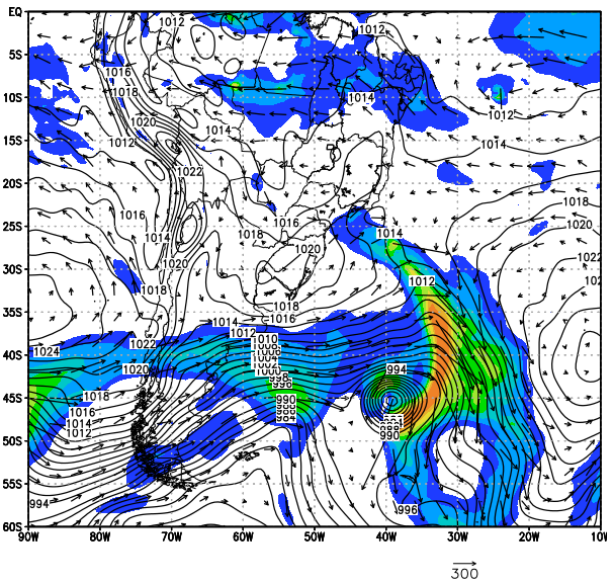


Figura 4.9 – Final.

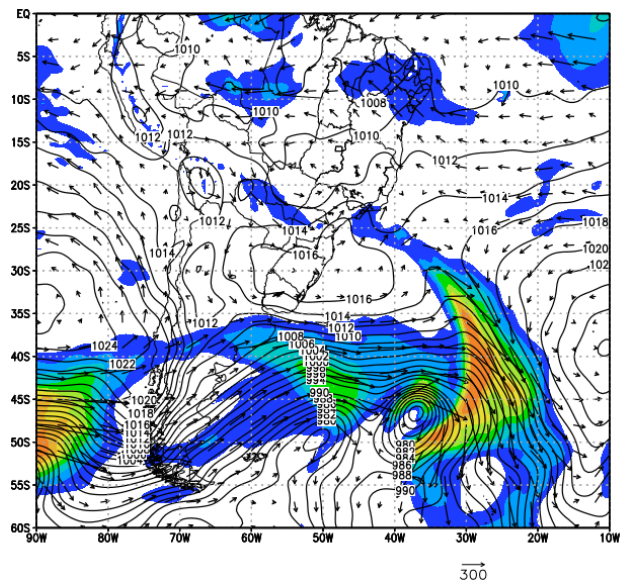
Na Figura 4.10 são exibidos os campos do fluxo de umidade verticalmente integrado entre 1000 e 300 hPa e a pressão atmosférica ao nível médio do mar. Na Figura 4.10a, às 1200 UTC do dia 24/04, é possível notar forte fluxo de umidade em direção ao Rio de Janeiro devido à chegada do SF. Valores ainda elevados desse fluxo de umidade permanecem sobre a cidade às 1800 UTC desse dia (Figura 4.10b), porém, às 0000 UTC do dia 25/04 (Figura 4.10c), o fluxo de umidade se enfraquece próximo ao continente à medida que o SF avança sobre o mar. No horário seguinte, 0000 UTC do dia 25/06 (Figura 4.10d), baixos valores de fluxo de umidade ocorrem sobre o continente.

A partir das 1200 UTC do dia 25/04, observa-se um novo aumento no fluxo de umidade próximo ao Rio de Janeiro (Figura 4.10e). Na Figura 4.10f, às 1800 UTC do dia 25/04, horas antes do evento de chuva muito intensa, nota-se moderado fluxo de umidade sobre o Rio de Janeiro e oceano. Após esse horário, não se observa fluxo de umidade significativo sobre o MRJ e adjacências (Figura 4.10g e 4.10h).

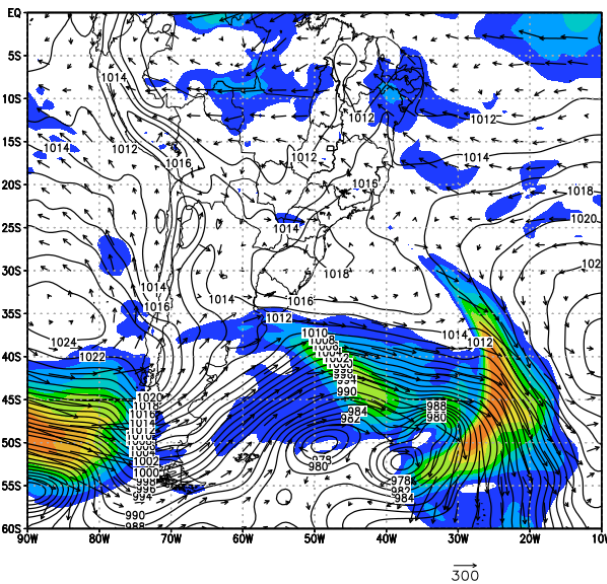
(a) 1200 UTC 24/04



(b) 1800 UTC 24/04



(c) 0000 UTC 25/04



(d) 0600 UTC 25/04

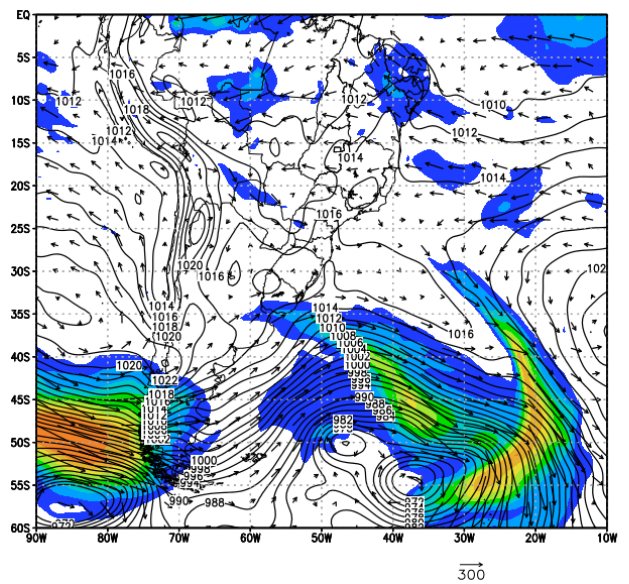
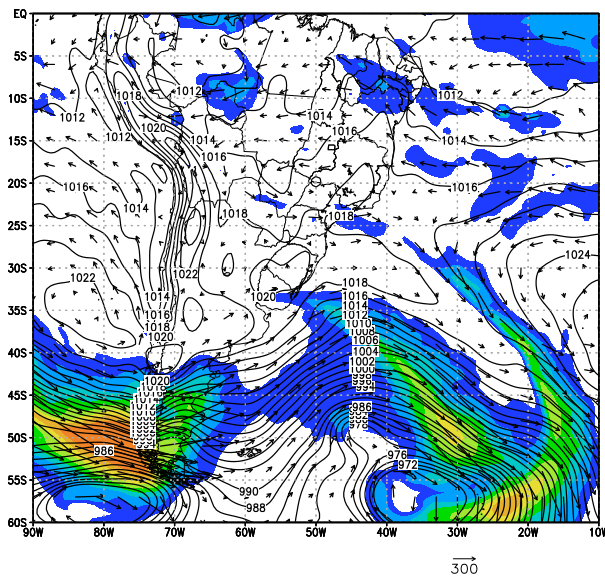
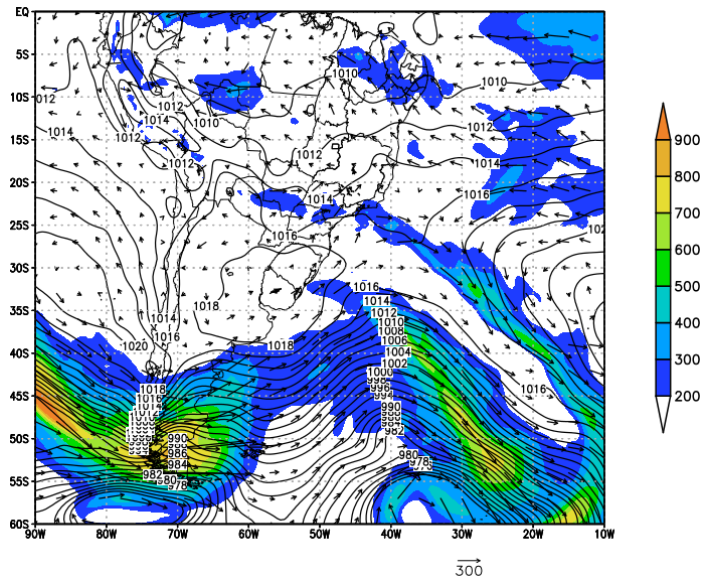


Figura 4.10 - PNMM (hPa) (linha), magnitude do fluxo de umidade verticalmente integrado de 1000 a 300 hPa ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (sombreado) e direção do fluxo de umidade verticalmente integrado ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (vetor): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.

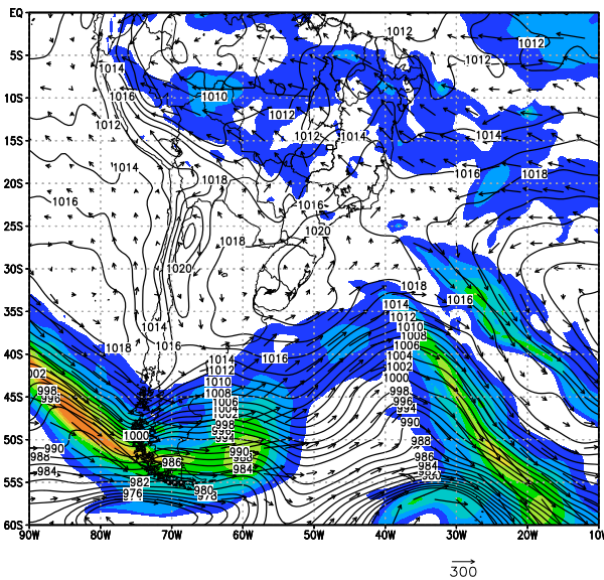
(e) 1200 UTC 25/04



(f) 1800 UTC 25/04



(g) 0000 UTC 26/04



(h) 0600 UTC 26/04

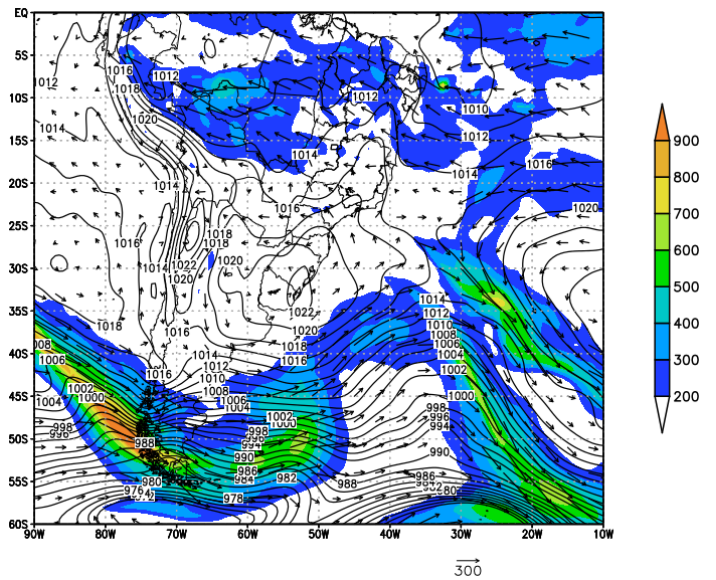


Figura 4.10 – Final.

Na Figura 4.11 são apresentados os campos de PNMM e espessura da camada entre 1000 e 500 hPa. No dia 24/04 às 1200 UTC (Figura 4.11a), é possível notar que, a leste do cavado (segmento de reta vermelho) associado ao ciclone com centro em 45°S/40°W (círculo vermelho), encontra-se ar mais quente, o que pode ser deduzido devido a maior espessura da camada atmosférica entre 1000 e 500 hPa. Por outro lado, à oeste desse cavado observa-se ar mais frio. Essas características são observadas em sistemas baroclínicos como os sistemas frontais. À medida que esse cavado avança sobre



o mar nos horários seguintes, o caráter baroclínio perde força até que o ciclone se encontre totalmente embebido em mais ar frio às 0000 UTC do dia 25/04 (Figura 4.11c).

Às 0000 UTC do dia 25/04, surge na retaguarda do primeiro ciclone, um outro ciclone (círculo vermelho). Esse segundo sistema de baixa pressão, apresenta menor inclinação entre sua dianteira e retaguarda se comparado ao primeiro ciclone no início do dia 24/04. Na Figura 4.11d, às 0600 UTC do dia 25/04, o cavado associado a esse segundo ciclone (segmento de reta vermelho) ganha amplitude e se move para leste. No horário seguinte, às 1200 UTC do dia 25/04, os dois centros de baixas pressões começam a se misturar (Figura 4.11e). Na Figura 4.11f, o cavado avança ainda mais sobre o mar e nesse momento se observa diminuição da espessura da camada atmosférica sobre a região próxima ao litoral do MRJ. Pode-se notar também que, às 1800 UTC do dia 25/04, o trem de ondas representado pela sucessão de cavados e cristas sobre os oceanos e o continente, mostra-se muito bem configurado. A crista formada na retaguarda do cavado (às 1800 UTC) se intensifica mostrando forte gradiente de espessura de 30°S a 50°S e 70°W a 80°W. Às 0000 e 0600 UTC do dia 26/04 (Figura 4.11g e 4.11h), nota-se forte aumento na amplitude do cavado e redução da espessura da camada atmosférica sobre o MRJ.

(a) 1200 UTC 24/04

(b) 1800 UTC 24/04

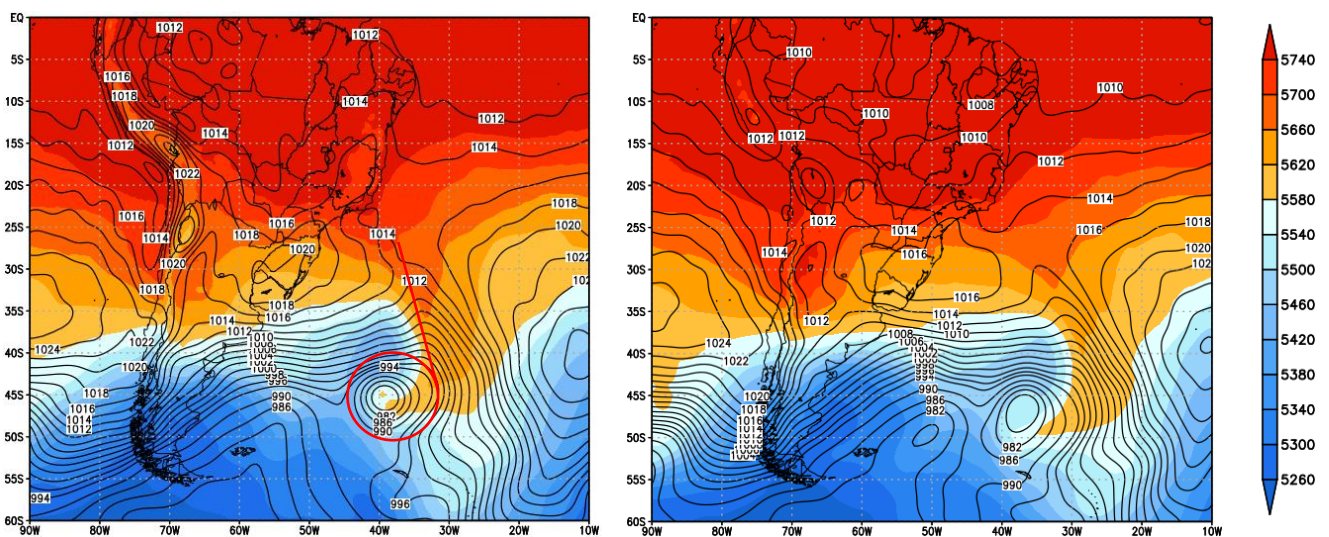
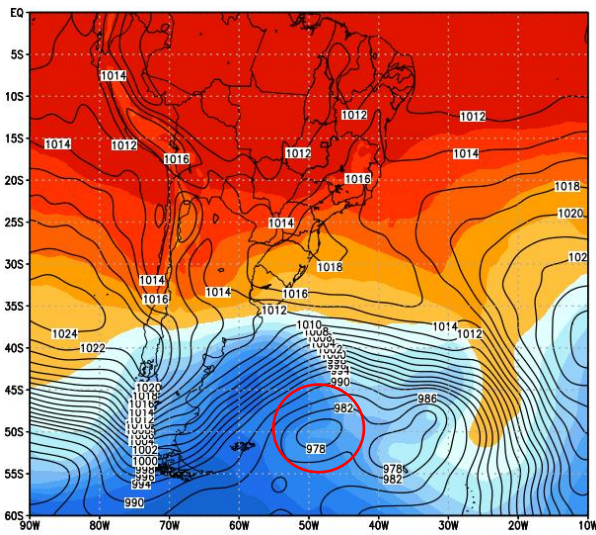
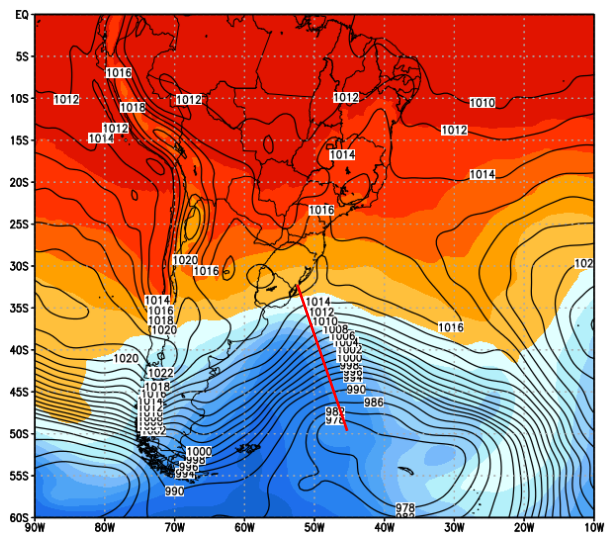


Figura 4.11 - PNMM (hPa) (linha) e espessura da camada entre 1000 e 500 hPa (mgp) (sombreado): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.

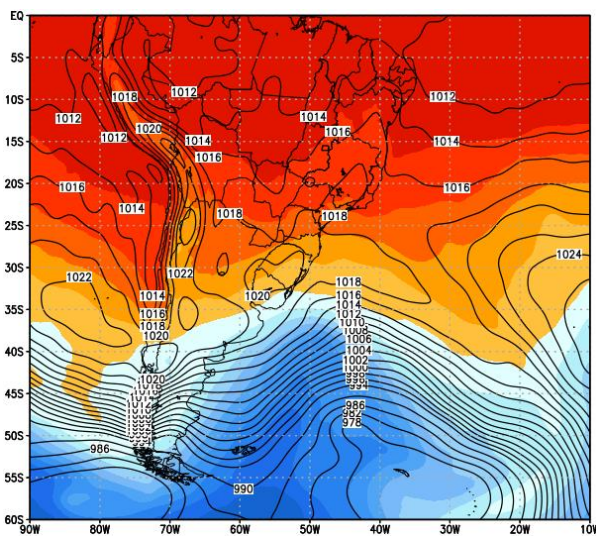
(c) 0000 UTC 25/04



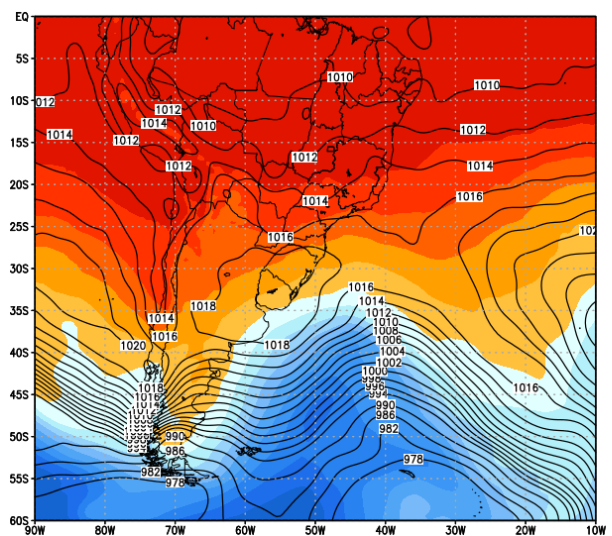
(d) 0600 UTC 25/04



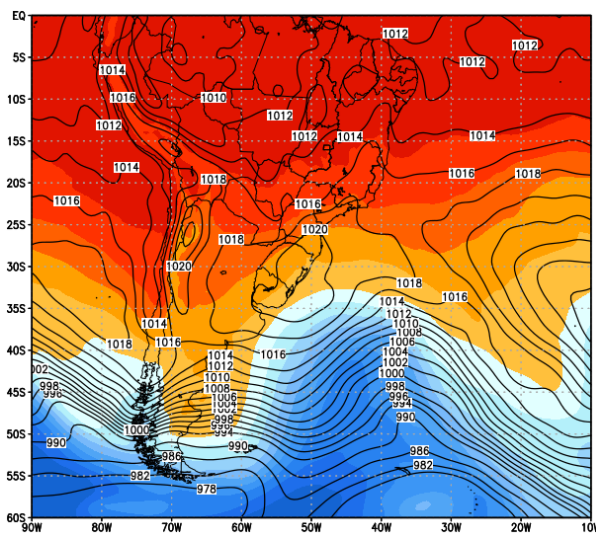
(e) 1200 UTC 25/04



(f) 1800 UTC 25/04



(g) 0000 UTC 26/04



(h) 0600 UTC 26/04

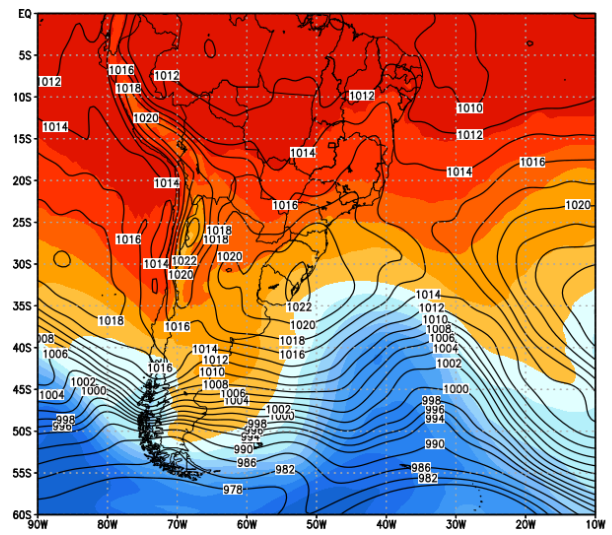


Figura 4.11 – Final.

Os campos de linhas de corrente e altura geopotencial em 250 hPa estão representados na Figura 4.12. No dia 24/04 às 1200 UTC (Figura 4.12a), é possível observar o cavado (segmento de reta vermelho) que fornece suporte ao SF atuante sobre a Região Sudeste nesse dia. Esse cavado move-se para leste nos horários seguintes dando lugar a uma segunda onda que também esteve presente nas análises anteriores. Também é possível notar nesse campo que, na noite do dia 24/04 (Figura 4.12c), durante o dia 25/04 (Figura 4.12d, 4.12e, 4.12f e 4.12g) e na madrugada do dia 26/04 (Figura 4.12h), ocorre forte aumento na amplitude dessa onda, assim como foi visto nos níveis atmosféricos inferiores. Pode-se dizer então que, o sistema de escala sinótica atuante sobre a região durante o dia do caso de chuva muito intensa, apresentava suporte dinâmico desde o nível da superfície até os níveis mais altos da atmosfera.

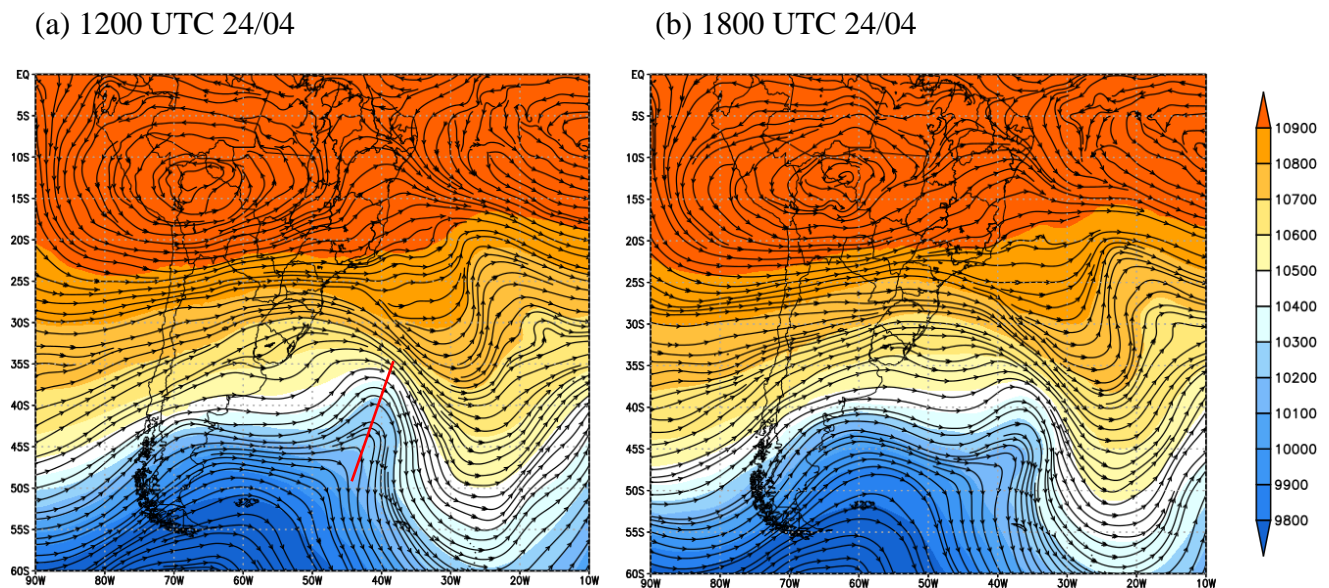
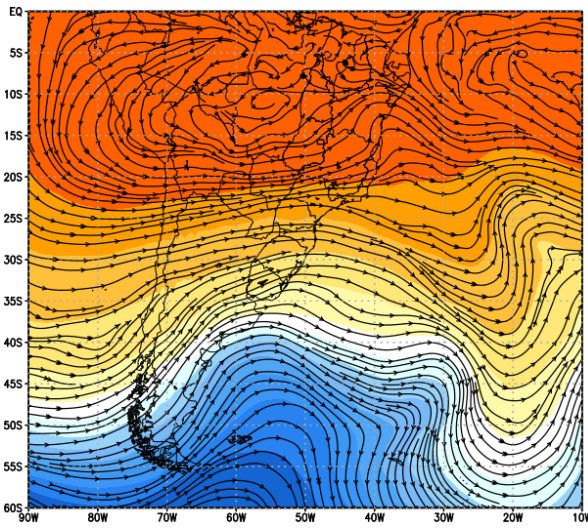
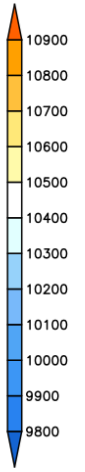
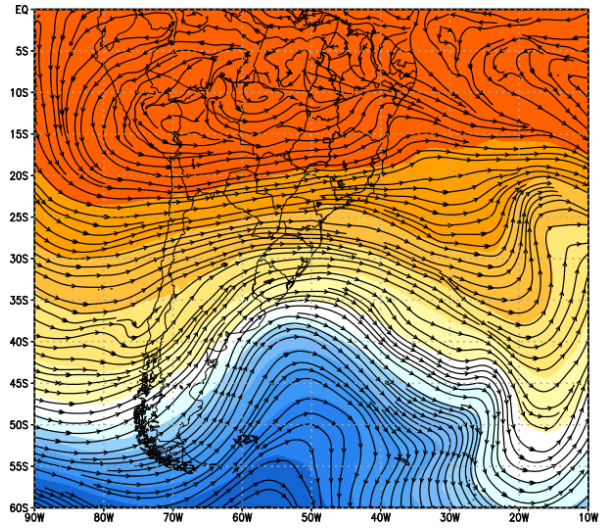


Figura 4.12 – Linhas de corrente em 250 hPa e altura geopotencial em 250 hPa (sombreado): (a) 1200 UTC 24/04, (b) 1800 UTC 24/04, (c) 0000 UTC 25/04, (d) 0600 UTC 25/04, (e) 1200 UTC 25/04, (f) 1800 UTC 25/04, (g) 0000 UTC 26/04 e (h) 0600 UTC 26/04.

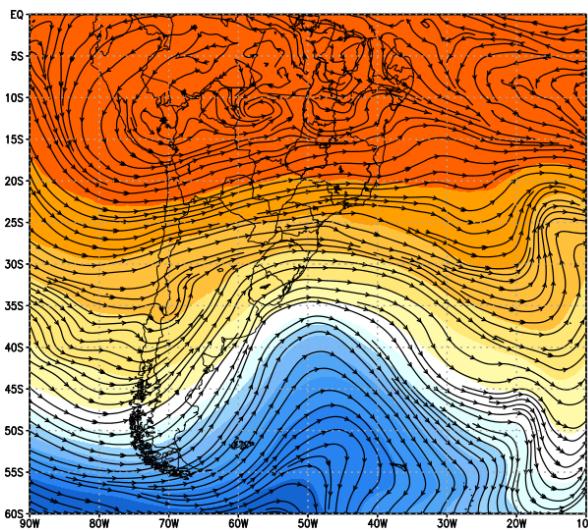
(c) 0000 UTC 25/04



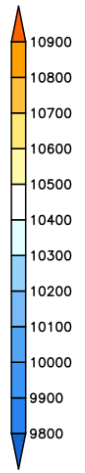
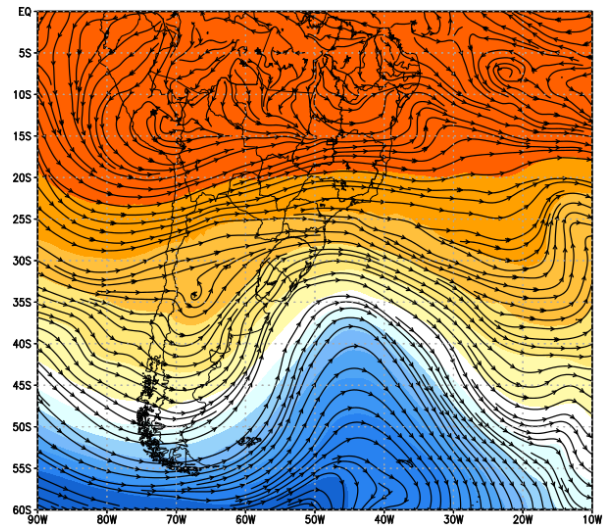
(d) 0600 UTC 25/04



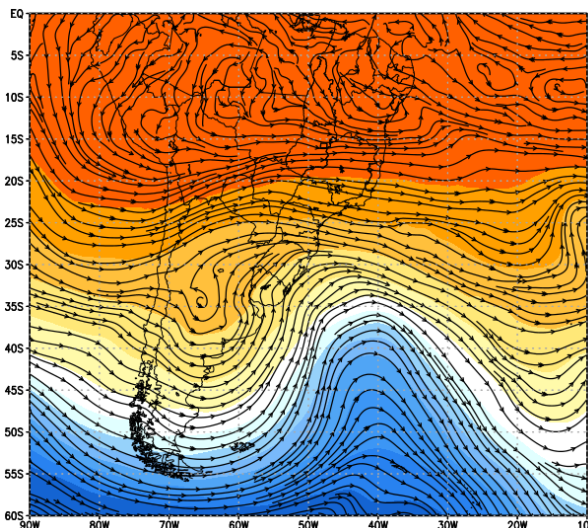
(e) 1200 UTC 25/04



(f) 1800 UTC 25/04



(g) 0000 UTC 26/04



(h) 0600 UTC 26/04

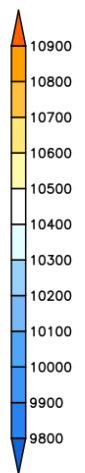
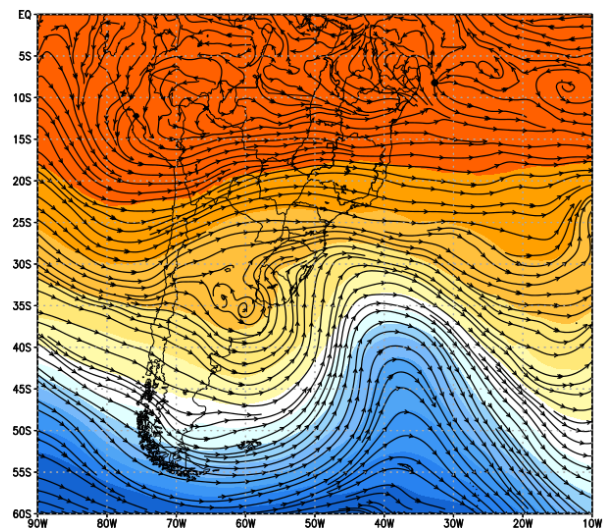


Figura 4.12 – Final.

#### **4.4 Síntese**

As análises apresentadas na seção anterior indicam que, após a passagem de um SF pela Região Sudeste no dia 24/04, surgiu na retaguarda da onda baroclínica, uma segunda perturbação. Essa segunda onda ganha força e amplitude durante o dia 25/04 enquanto avança sobre o oceano aproximando-se do litoral da Região Sudeste na noite desse dia. Nas imagens de satélite pode-se notar algo que se assemelha a um “recuo” do SF que já se encontrava longe do MRJ na manhã do dia 25/04. Além do regresso do SF sobre o MRJ, nota-se nas imagens de satélite, uma ondulação na banda de nebulosidade que não é percebida nos campos da Reanálise.

Além da instabilidade atmosférica proporcionada pela passagem do SF e pela segunda onda, sobre o MRJ havia condições termodinâmicas favoráveis à formação de tempestades de acordo com os diagramas Skew-T apresentados. Também foram observados nos diagramas Skew-T, no meteograma e nos campos da Reanálise, ventos predominantemente de sul, que advectavam umidade do oceano para o continente.

## 5. Conclusões e Considerações Finais

O objetivo é ampliar o conhecimento sobre os mecanismos atmosféricos favoráveis à ocorrência de eventos de chuva intensa, colaborando assim para previsão de tempo de eventuais casos sobre a cidade do Rio de Janeiro. Neste trabalho desenvolve-se um estudo de caso de chuva intensa ocorrido no MRJ entre os dias 24 e 26 de abril de 2011.

Após a chegada de uma frente fria sobre a Região Sudeste na tarde do dia 24/04/2011, são observados no dia 26/04, valores altos de acumulados de chuva em 24 horas, caracterizando um evento de chuva intensa a muito intensa segundo os limiares propostos por Pristo *et al.* (2018). Na estação Tijuca/Muda foram acumulados 276,0 mm. dia<sup>-1</sup> (no dia 26/04), valor quase 2 vezes maior do que a média climatológica para o mês de abril na estação Tijuca. Devido à chuva intensa, vários pontos de alagamento foram identificados pela cidade inclusive o transbordamento do rio Maracanã.

Os resultados mostram que no dia 24/04 um SF atuou sobre o MRJ ocasionando chuva moderada a intensa. Na manhã e tarde do dia 25/04 o SF se afastou do continente atuando com mais intensidade sobre o mar. Na noite do dia 25/04, o SF reconfigurou a convecção sobre o MRJ, ocasionando tempestades no final da noite e início da madrugada do dia 26/04. Uma ondulação na banda de nebulosidade frontal, provavelmente associada à atuação de um sistema de escala inferior, foi observada na noite do dia 25/04. Na manhã do dia 27/04, o SF deixou de atuar sobre a região movendo-se para o mar. Análise do diagrama Skew-T de SGBL à 0000 UTC do dia 26/04, indicam que a atmosfera encontrava-se quase saturada nos baixos níveis e mais seca nos níveis superiores, a direção predominante do vento era de sul nos baixos níveis e os índices de instabilidade Total Totals, K, LI e CAPE eram favoráveis à ocorrência de tempestades.

A análise do campo de PNMM mostra no dia 24/04 a atuação de um cavado intenso sobre o oceano Atlântico configurando o SF sobre a Região Sudeste e ventos de quadrante sul sobre o MRJ e adjacências. No início do dia 25/04 esse escoamento de sul sofre enfraquecimento e o SF se afasta do continente. Posteriormente, uma segunda onda formou-se a oeste do cavado frontal e ganhou amplitude durante o dia. Na noite do caso de chuva intensa (25/04) são observados em superfície ventos moderados de quadrante sul e convergência de massa sobre o MRJ. Analisando o campo de espessura da camada entre 1000 e 500 hPa e o campo de PNMM, nota-se que o cavado associado à chegada do SF no dia 24/04 apresenta estrutura vertical mais baroclínica se comparada a estrutura

vertical do segundo cavado atuante no dia 25/04. No dia 25/04 às 1800 UTC, o trem de ondas atuante sobre os oceanos e continente apresenta-se bem configurado, composto por cavados e cristas com gradientes intensos.

Do ponto de vista da escala sinótica, é possível notar a atuação de dois cavados sucessivos: o primeiro associado à chegada do SF e o segundo reconfigurando a convecção sobre o continente após o primeiro cavado já ter se afastado da região. Nos diversos campos analisados observa-se um predomínio de escoamento de sul perpendicular à costa do Rio de Janeiro nos primeiros níveis atmosféricos assim como também destacado por Baima e Karam (2014) e Andrade *et al.* (2015) em seus trabalhos.

Então, o transporte de ar úmido para dentro do continente, a instabilidade fornecida pela atuação do SF e a forçante mecânica da orografia do MRJ corroboraram para a ocorrência da tempestade. Para trabalhos futuros, recomenda-se maior aprofundamento da análise deste caso utilizando modelos regionais e de mesoescala, visto que existem sistemas de menor escala que atuam intensificando a convecção e que não são identificados na escala sinótica.

## 6. Referências Bibliográficas

“Caracterização da precipitação durante o mês de abril – 1997 a 2016 – no município do rio de janeiro.” Disponível em <<http://alertario.rio.rj.gov.br/>> acessado em 11 de agosto de 2018.

“Dados pluviométricos”, disponíveis em <<http://alertario.rio.rj.gov.br/>> acessado em 20 de abril de 2018.

“Temporal provoca queda de árvore e alaga ruas em vários pontos do RJ”. Disponível em <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/04/temporal-provoca-queda-de-arvore-e-alaga-ruas-em-varios-pontos-do-rj.html>>

ANDRADE, K. M.; PINHEIRO, H. R.; NETO, G. D. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 37 Ed. Especial SIC, 2015, p. 175 – 180.

BAIMA, F. B. S.; KARAM, H. A. Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ ISSN 0101-9759e-ISSN 1982-3908 - Vol. 37 - 1 / 2014 p. 17-26.

BRAGA, R. N. S.; HORA, M. A. G. M.; LYRA, G. B.; NASCENTES, A. L. Determinação e interpolação dos coeficientes das equações de chuvas intensas para cidade do Rio de Janeiro. Rev. Ambient. Água vol. 13 n. 1, e2076 - Taubaté 2018.

BRASILIANSE, C. S.; DERECKYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; RANDEK, V. S. S.; CALADO, R. N. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. Royal Meteorological Society, Meteorol. Appl. 25: 66–77 (2018), 23 de Agosto de 2017. DOI: 10.1002/met.1670.

CAMBRA, M. E.; NETTO, A. N. C. A cidade do rio de janeiro e as chuvas de março/93: (des) organização urbana e inundações, anuário do instituto de geociências, Volume 20 Pp. 55-70, 1997.



CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. Frentes frias sobre o Brasil, pp. 135-145.

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.; 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.

Diagramas Skew-T SBGL disponíveis em <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> acessado em 10 de outubro de 2018.

DOSWELL, C. A.; RASMUSSEN, E. N. The Effect of Neglecting the Virtual Temperature Correction on CAPE Calculations. Weather and Forecasting, v. 9, n. 4, pp. 625–629, 1994.

EK, M. B.; MITCHELL, K. E., LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLAY, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. J. Geophys. Res., 2003.

GALWAY, J. G., The lifted index as a predictor of latent instability. Bull. Amer. Meteor. Soc., v. 43, pp. 528-529, 1956.

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

GRIFFIES, S. M.; AND R. W. HALLBERG, 2000: Biharmonic friction with a Smagorinsky viscosity for use in largescale eddy-permitting ocean models. Mon. Wea. Rev., 128, 2935–2946.

HUFFMAN, G. J.; R. F. ADLER, D. T. BOLVIN, G. GU, E. J. NELKIN, K. P. BOWMAN, E. F. STOCKER, D. B. Wolff The TRMM multi satellite precipitation

analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales J. Hydrometeorol., 8 (2007), pp. 38–55.

Imagens do satélite Meteosat-9 disponíveis em <<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo>> acessado em 16 de agosto de 2018.

KODAMA, Y.; SAGAWA, T.; YOSHIKANE, T. 2012. Roles of the Brazilian plateau in the formation of the SACZ. J. Clim. 25: 1745 – 1758.

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.

MARQUES, V. S.; CARDOSO, D.; PINHEIRO, F. M. A.; MOREIRA, J. C. Análise de Temporais Intensos no Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Meteorologia, v.16, n.2,145-156, 2001.

Meteograma para SBGL disponível em <<http://weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/samerica.shtml>> acessado em 10 de outubro de 2018.

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, pp. 190, 1972.

MOURA, C. R.; ESCOBAR, G. C. J.; ANDRADE, K. M. Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.3, 267 - 280, 2013.

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, 2005.

NILSEN, D. M.; BELÉM, A. L.; MARTON, E.; CATALDI, M. Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone, 09 de outubro de 2018.

PENNA, A. C.; NETO, G. D. Extremos de Chuva na cidade de São Paulo: Padrões atmosféricos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, julho de 2014.

PINHEIRO, H. R.; ANDRADE, K. M, MOURA, C.W. A maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE. In: Simpósio Internacional de Climatologia, 2011, João Pessoa-PB. Anais. 2011. DVD.

POLIFKE, P. S.; ROTUNNO FILHO, O. C.; SAMPAIO, R. F.; DRAGAUD, I. C. D. V.; ARAÚJO, A. A. M.; JUSTI, M. G. A.; PIRES, G. D. Springer-Verlag GmbH Austria, part of Springer Nature, 13 de Dezembro de 2017.

Portal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponível em <<https://www.ibge.gov.br/>> acessado em 10 de agosto de 2018.

PRISTO, M.; DERECKYNSKI, C. P. Revista Brasileira de Meteorologia, 2018.

QUADRO, M. F. L. Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. 1994. 123 p. (INPE-6341-TDI/593). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTCm13@80/2005/08.26.14.10>> .

QUADRO, M. F. L.; DIAS, M. A. F. S.; HERDIES, D. L. Análise de um Vórtice Ciclônico e Mesoescala Associado a ZCAS em Janeiro de 2009, Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 3, 273-287, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150141>.

RANGEL, R. H. O. Estudo de previsibilidade para dois eventos de tempestade no estado do Rio de Janeiro. COPPE – UFRJ, 2014.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, DANIEL A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. Weather and Forecasting, v. 25, p. 885-894, 2010.

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. *J. Climate*, 27, 2014, pp. 2185-2208.

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.

SIQUEIRA, J. R.; MARQUES, V. S. Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas. *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 39 - 2 / 2016 p. 57-76.

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.