

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE-CLIAMB

**ESTRUTURA E EVOLUÇÃO DE FRENTES FRIAS INTENSAS NA REGIÃO
AMAZÔNICA BRASILEIRA**

Alcides de Castro Amorim Neto

Manaus-Amazonas

Maio - 2013

Alcides de Castro Amorim Neto

**ESTRUTURA E EVOLUÇÃO DE FRENTES FRIAS INTENSAS NA
REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA**

Orientadores: Prof. Dr. Prakki Satyamurty

Prof. Dr. Francis Wagner Correia.

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente do convênio INPA/UEA, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Clima e Ambiente com ênfase na área de concentração em Interação Biosfera-Atmosfera.

Manaus-Amazonas

Maio - 2013

A524 Amorim Neto, Alcides de Castro

Estrutura e evolução de frentes frias intensas na região amazônica brasileira / Alcides de Castro Amorim Neto. --- Manaus : [s.n.], 2013.
121 f. : il.

Tese (doutorado) --- INPA / UEA, Manaus, 2013.

Orientador : Prakki Satyamurty

Coorientador : Francis Wagner Silva Correia

Área de Concentração : Interações Clima-Biosfera na Amazônia

1. Friagens. 2. Circulação atmosférica. 3. Frontogênese. 4.
Modelagem Numérica.

I. Título.

CDD 19. ed. 551.6

Encontramos uma estranha pegada nas areias do desconhecido. Formulamos teorias profundas, uma após a outra, para mostrar sua origem. Finalmente, conseguimos reconstruir a criatura que deixou a pegada. E vejam! A pegada é nossa.

Arthur Eddington, 1882-1944

Agradecimentos

A Deus acima de tudo

Ao Prof. Dr. Prakki Satyamurty pela total orientação e paciência prestada.

Ao Prof. Dr. Francis Wagner pela orientação dada.

Aos meus pais, irmãos e namorada pelo incentivo dado em todos os momentos.

A todos os amigos, em particular a Liviany, Samuel e Paulo Ricardo pela ajuda constante.

À parceria INPA/UEA pela oportunidade de desenvolver este estudo.

RESUMO

Algumas características observadas dos casos de frentes frias sobre a Bacia amazônica durante dez anos, no período de 2001-2010, são descritas. A precipitação e a subsequente queda de temperatura em Manaus (3°S, 60°W) associada com a passagem de frentes frias acontecem dois dias depois de serem observadas em São Paulo. Uma média de chuvas de 34 mm no dia da passagem da frente sobre a Bacia amazônica no verão austral e de 38 mm durante o inverno austral, são valores substancialmente elevados em relação aos dias que antecedem e sucedem o evento (aproximadamente 5 mm dia⁻¹). A queda de temperatura mínima é menor quando comparada com a temperatura máxima, que é de cerca de 8°C em 48 horas observadas em Manaus. As anomalias de vento em baixo nível ao sul de 10°S sobre a Bolívia, Paraguai e Sul do Brasil associadas aos sistemas frontais, durante o verão austral, mostram correntes de ar frio do sul. O desenvolvimento de um cavado invertido na baixa troposfera sobre o continente nos subtropicais faz com que os ventos de sul se fortaleçam e cheguem à Bacia Amazônica. Um cavado extratropical em escala sinótica em 850 hPa ao sul de 30°S no Atlântico Sul se desloca de 40°W a 30°W em dois dias. A alta troposfera apresenta uma circulação anômala ciclônica fechada com seu centro ao longo da costa sul do Brasil. A convergência de fluxo de umidade sobre a bacia amazônica durante a passagem de frentes frias é mais intensa que a climatologia, e dessa forma contribui para a ocorrência de chuvas fortes. A precipitação e a queda de temperatura associados com frentes frias na Bacia amazônica apresentaram uma baixa correlação, o que dificulta o estudo desses fenômenos sinóticos na região amazônica. As simulações realizadas utilizando o modelo regional Eta, mostraram que, tanto a parametrização convectiva Betts-Miller (BM) quanto Kain-Fritsch com fluxo de momento (KFm) apresentam uma boa consistência no padrão observado, simulando de forma satisfatória a variação diurna das variáveis meteorológicas. Todavia, nenhuma delas mostrou-se melhor em relação à outra, alternando-se entre subestimativas e

superestimativas. A função frontogênica mostrou um bom diagnóstico do caso de friagem estudado, indicando satisfatoriamente as áreas frontogênicas e frontolíticas.

ABSTRACT

Some observed characteristics of the cold frontal incursions into the Amazon Basin during the ten year period 2001-2010 are described. The precipitation and the subsequent fall of temperature at Manaus (3°S, 60°W) associated with the cold frontal passages occur two days later than at São Paulo. The mean precipitation of 34 mm/day on the day of the passage of the front over Manaus in the austral summer and 38 mm/day in austral winter are substantially larger than the precipitation on the preceding and the succeeding days, showing the importance of frontal passages for the rainfall in the basin. The fall of minimum temperature associated with the cold air incursion is much smaller than the fall of maximum temperature, of the order of 8°C in 48 hours observed at Manaus. The low-level wind anomalies to the south of 10°S over Bolivia, Paraguay and southern Brazil in the austral summer frontal event composites show cold southerlies. The development of an inverted trough in the lower troposphere over the continent in the subtropics makes the southerly winds to strengthen and reach the Amazon Basin. The extratropical synoptic scale trough at 850 hPa level to the south of 30°S in the South Atlantic moves from 40°W to 30°W in two days. The upper troposphere wind anomalies show a closed cyclonic circulation with its center off the coast of southern Brazil. The moisture flux convergence over the Amazon basin during frontal passages is more intense and accounts for the rainfall. The rainfall and the fall of temperature associated with fronts in the Amazon Basin have small correlation, which complicates the study of these synoptic phenomena in the Amazon region. The simulations using the Eta regional model, showed that both the convective parameterization Betts-Miller (BM) and Kain-Fritsch with momentum flux (KFm) showed good consistency with the pattern observed, satisfactorily simulating the diurnal variation of the meteorological variables. However, none of them proved to be better over the other, alternating between underestimation and overestimation.

The frontogenetic function is a good diagnostic of the case studied, indicating the areas of frontogenesis and frontolysis satisfactorily.

Sumário

CAPÍTULO 1	8
1.1. INTRODUÇÃO	8
1.2. HIPÓTESES	11
1.3. OBJETIVOS	12
1.4. JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO	13
CAPÍTULO 2	14
2.1. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.2. CLIMATOLOGIA DA REGIÃO AMAZÔNICA	23
CAPÍTULO 3	27
3.1. DADOS E METODOLOGIA	27
3.1.1. Dados	27
3.1.2. Metodologia	29
3.2. ESTUDO OBSERVACIONAL DOS EPISÓDIOS DE FRENTES FRIAS	30
3.3. CAMPOS COMPOSTOS	34
3.4. DIAGNÓSTICO DE EVOLUÇÃO DE FRIAGENS	35
3.4.1. Convergência de Umidade	35
3.4.2. Campo de Deformação	35
3.4.3. Gradiente Térmico	36
3.4.4. Advecção Térmica	37
3.4.5. Função Frontogenética de Petterssen	37
CAPÍTULO 4	41
4.1. MODELO REGIONAL ETA	41
4.2. ESTRATÉGIA DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA	42
4.3. AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO	44
CAPÍTULO 5	46
5.1. RESULTADOS	46
5.1.1. Climatologia de Passagens de Frentes Frias na Amazônia	46
5.2. ESTUDO OBSERVACIONAL	46
5.2.1 Composto dos Eventos de Frentes Frias na Região Amazônica durante o Inverno Austral	51
5.3. IMPACTO DAS FRENTES FRIAS EM MANAUS	65
CAPÍTULO 6	79
6.1. ESTUDO DE CASO : Diagnóstico	79
6.1.1. Diagnóstico do Campo de Deformação	83
6.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	88
6.2.1. Avaliação da Temperatura	88
6.2.2. Evolução da Pressão	92
6.2.3. Evolução da Umidade	95
6.2.4. Evolução da Precipitação	98
CAPÍTULO 7	107
7.1. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	107
REFERÊNCIAS	112
APÊNDICE	118

Lista de Figuras

- Figura 2.1** – Visão esquemática mostrando a inclinação de uma frente fria e de uma frente quente e sua escala horizontal média.....15
- Figura 2.2** - Processos cinemáticos que compactam ou afastam as isotermas. A coluna esquerda mostra as isotermas antes e a da direita após o compactamento, onde a variável $J = \frac{dQ}{dt}$. (Adaptada de Satyamurty, 2004).....18
- Figura 2.3** - Ação do campo de deformação sobre o campo térmico para produzir frontogênese ou frontólise. (Adaptada de Satyamurty, 2004).....19
- Figura 2.4** - Frente fria ocorrida em 11/07/2006 as 00:00Z. Os centros de alta e baixa pressão são indicados por A e B, respectivamente.....20
- Figura 2.5** - Imagem do Satélite GOES, em 11/02/2009, às 19:00Z mostrando a fronteira entre a massa de ar frio e quente.....21
- Figura 2.6** - Imagem do satélite GOES de um evento de frente fria que atingiu a Amazônia.21
- Figura 3.1** - Mapa do Brasil com destaque para a área de estudo, isto é, a Amazônia.....29
- Figura 3.2** - Evolução da Temperatura, Pressão e Umidade durante um evento de passagem de frente fria em São Paulo ocorrida em julho e agosto de 2011. Dados plotados em intervalos de 12 horas (00 e 12 TMG).....31
- Figura 3.3** - Evolução da Temperatura, Pressão e Umidade durante um evento de passagem de frente fria que atingiu a região Amazônica em Maio de 2007. Dados plotados em intervalos de 12 horas (00 e 12 TMG)32
- Figura 3.4** - Esquematização dos campos de deformação nos casos em (a) $D_2 = 0$ e $D_1 > 0$;

(b) $D_2 = 0$ e $D_1 < 0$; (c) $D_1 = 0$ e $D_2 > 0$ e (d) $D_1 = 0$ e $D_2 < 0$ 37

Figura 3.5 - Esquema do campo de deformação do escoamento na América do Sul. As isothermas estão representadas de tal forma que $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$38

Figura 5.1 - Precipitação e temperatura observada em Manaus no dia D durante os 24 eventos de frentes frias na Amazônia no período 2000-2010. A Correlação obtida foi de 0,089.....48

Figura 5.2 - Climatologia da região (no topo), composto dos eventos de friagens (no meio) e anomalia (em baixo) da precipitação em mm/dia, no período de maio a setembro, para o dia D da passagem do evento de FF.....52

Figura 5.3 - Climatologia (topo), Composto (meio) e Anomalia (em baixo) da temperatura em °C dos eventos de friagens ocorrido no período de maio a setembro.....53

Figura 5.4 - Composto da precipitação em mm/dia nos dias D-1, D e D+1, respectivamente, durante os eventos de Frentes Frias.....55

Figura 5.5 - Como na fig. 5.4, exceto para a temperatura, em °C.....56

Figura 5.6 - Climatologia (em cima), composto (no meio) e anomalia (em baixo) dos campos de ventos em 850 hPa para o inverno austral. O vermelho representa divergência e o azul convergência de umidade.....55

Figura 5.7 - Composto (à esquerda) e Anomalia (à direita) de ventos em 200 hPa para os dias D-1(topo), D (meio) e D+1 (em baixo) da ocorrência do evento de frente fria.....57

Figura 5.8 - Composto (à esquerda) e Anomalia (à direita) de ventos em 925 hPa para os dias D-1(topo), D (meio) e D+1 (em baixo) da ocorrência do evento de frente fria.....60

Figura 5.9 - Climatologia (topo), composto (meio) e anomalia (em baixo) do fluxo de umidade integrado na vertical (vetores), convergência de umidade (sombreada), para os

eventos de Frentes Frias na Bacia Amazônia. Unidades do fluxo: $10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Unidades do fluxo de convergência: 10^{-5} m s^{-1}	62
Figura 5.10 - Anomalia em 850 hPa (em cima) e em 200 hPa (em baixo) da Vorticidade Relativa.....	64
Figura 5.11 - Sequência de (a) Precipitação (mm/dia), (b) Temperatura Máxima e (c) Temperatura Mínima em São Paulo, Brasília e Manaus para a passagem de Frente Fria. Evento 24 da tabela 5.1: 12-21 de julho de 2010.....	66
Figura 5.12 - Altura Geopotencial para D-1 (topo), D (meio) e D+1(em baixo). Evento 24 da tabela 5.1: 12-21 de julho de 2010.....	69
Figura 5.13 - Como na figura 5.12, exceto para a temperatura, em $^{\circ}\text{C}$	70
Figura 5.14 - Como na figura 5.12, exceto para os campos de ventos, em m/s.....	71
Figura 5.15 - Como na figura 5.11, exceto para o evento 17 da tabela 5.1: 21-31 de maio de 2007.....	73
Figura 5.16 - Altura geopotencial para D-1 (topo), D (meio) e D+1 (em baixo). Evento 17 da tabela 5.1: 21-31 de maio de 2007.....	75
Figura 5.17 - Como na figura 5.16, exceto para a temperatura, em $^{\circ}\text{C}$	76
Figura 5.18 - Como na figura 5.16, exceto para os campos de ventos, em m/s.....	77
Figura 6.1 - Imagens do Satélite GOES no canal realçada, para os dias 15/07/2010 às 12h UTC (a), 16/07/2010 às 00h UTC (b), 16/07/2010 às 12h UTC (c), 17/07/2010 às 00h UTC (d), 17/07/2010 às 12h UTC (e) e 18/07/2010 às 00h UTC (f)	80

Figura 6.2: Vorticidade Relativa em 850 hPa (coluna à esquerda) e em 200 hPa (coluna à direita) em D-1 (acima), D (meio) e D+1 (em baixo) do evento de friagem 24 da tab. 5.1....82

Figura 6.3 - Deformação em 10^{-6} s^{-1} em (a); Gradiente Térmico em K/1000 km em (b); Advecção Térmica em $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ em (c) e Função Frontogénica em $10^{-6} \text{ km}^{-1}\text{s}^{-1}$, para o dia 15 de julho de 2010.....84

Figura 6.4 – Como na figura 6.3, exceto para 16 de julho de 2010.....85

Figura 6.5 – Como na figura 6.3, exceto para 17 de julho de 2010.....86

Figura 6.6 – Como na figura 6.3, exceto para 18 de julho de 2010.....87

Figura 6.7 - Ciclo diário da temperatura comparando a Observação e as simulações com as parametrizações de Betts-Miller (BM) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (KFm) para o período: (a) D-4 a D+3, (b) D-3 a D+3, (c) D-2 a D+3 e (d) D-1 a D+3.....90

Figura 6.8 - Erro Médio nas simulações até quatro dias antes do episódio de friagem para a variável temperatura.....91

Figura 6.9 - Observação e Simulações usando as parametrizações convectivas BM e KFm para a PNM para o período: (a) D-4 a D+3, (b) D-3 a D+3, (c) D-2 a D+3 e (d) D-1 a D+3.93

Figura 6.10 - Erro Médio das previsões usando os parâmetros BM e KFm para a PNM.....94

Figura 6.11 - Erro Médio Quadrático (REQM) da PNM usando as parametrizações BM e KFm.....95

Figura 6.12 - Observação e Simulações usando as parametrizações convectivas BM e KFm para a Umidade Relativa para o período: (a) D-4 a D+3, (b) D-3 a D+3, (c) D-2 a D+3 e (d) D-1 a D+3.....96

Figura 6.13 - Erro médio para a variável umidade relativa com as parametrizações KfM e BM.....	97
Figura 6.14 - Erro Médio Quadrático (REQM) para a variável umidade relativa com as parametrizações KfM e BM.....	98
Figura 6.15 - Evolução Temporal e Espacial da Precipitação com as Condições Iniciais do dia a ocorrência do evento. Em cada grupo de três painéis, os resultados do modelo usando parametrizações BM e KfM são dados no topo e a Observação é dada em baixo.....	100
Figura 6.16 - Conforme a figura 6.15, exceto com as Condições Iniciais do dia D-3.....	102
Figura 6.17 - Conforme a figura 6.15, exceto com as Condições Iniciais do dia D-2.....	103
Figura 6.18 - Conforme a figura 6.15, exceto com as Condições Iniciais do dia D-1.....	104

Lista de Tabelas

- Tabela 4.1** - Características das integrações para cada experimento utilizando o modelo Regional Eta tempo.....44
- Tabela 5.1** - Dados diários de Precipitação da estação de Manaus do INMET e Temperatura Média dos eventos de friagens que atingiram a região no período de 2000 a 2010 para os dias que antecedem (D-1), ocorrem (D) e sucedem (D+1) a FF. As linhas em negrito representam os casos ocorridos durante o verão amazônico.....49
- Tabela 6.1** - Precipitação Média e diária entre os dias 15 e 18/07/2010 durante a passagem de um evento de frente fria que atingiu a Amazônia mostrando os resultados apresentados pelo Modelo Regional Eta, resolução 40 Km e parametrizados por BM e KfM.....105

Lista de Siglas e Abreviaturas

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

GrADS - Sistema de Análise e Exibição de Grade

INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

METEOSAT - Satélite Meteorológico Geoestacionário da Agência Espacial Européia

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NCEP - National Center for Environmental Prediction

PNM - Pressão ao Nível do Mar

SYNOP - International Synoptic Surface Observation

TMG - Tempo Médio Greenwich

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

TRRM - Tropical Rainfall Measuring Mission

UTC - Coordenada Universal de Tempo

VCAN - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical.

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUÇÃO

A Amazônia exerce uma grande influência no clima regional e global através dos balanços de energia e hídrico (Salati e Marques, 1984). Entre muitas características distintas da Amazônia, pode-se destacar a grande quantidade de umidade que contribui para o regime de chuvas no sul e sudeste do país, o ciclo de carbono realizado pela floresta e sua grande diversidade de flora e fauna (Marengo, 2003; Nobre, 2008).

O clima da região é tropical e úmido, porém a variabilidade do regime de chuvas na Bacia Amazônica é resultado de várias interações de difícil entendimento das suas dinâmicas. A variabilidade espacial e temporal da precipitação na Amazônia está associada à influência de vários sistemas de mesoescala, escala sinótica e de grande escala. Entendê-los é um pré-requisito para melhorar as previsões de tempo desta região.

Ocorrem na atmosfera vários tipos de distúrbios transitórios. Entre os distúrbios de alta frequência, os mais comuns são os sistemas frontais. Estes sistemas são de grande importância devido ao fato de provocarem mudanças significativas no tempo em diversas partes do globo, principalmente na região subtropical e nas latitudes médias e altas, afetando a sociedade em geral (Cavalcanti, 1985).

Na América do Sul, geralmente os sistemas frontais provenientes do Oceano Pacífico deslocam-se para leste e, depois da passagem pela Cordilheira dos Andes, adquirem uma componente em direção ao Equador. Esses sistemas podem avançar pelo continente ou deslocar-se para o oceano Atlântico (Cavalcanti, 1985; Satyamurty et al., 1998; Seluchi et al., 1998). No Brasil, as frentes frias atuam durante todo o ano (Cavalcanti e Kousky, 2003) e afetam mais

significativamente as Regiões Sul e Sudeste, sendo responsáveis pelas chuvas, principalmente no sul do país (Quadro et al., 1996). Além disso, essas regiões são caracterizadas por serem bastante frontogenéticas, ou seja, áreas de passagem de frentes frias, como verificado por Mattos (1987). No entanto, como mostrado por Kousky (1979), a penetração de sistemas frontais e seus remanescentes têm um papel importante na precipitação também no sul da Região Norte e Nordeste. Kousky e Ferreira (1981) também mostraram a importância das frentes nas chuvas de inverno no norte do país. Oliveira (1986) fez uma climatologia das frentes frias e da interação com a convecção sobre a Amazônia, utilizando imagens de satélite. Dando continuidade ao trabalho, Oliveira et al. (1996) fizeram a climatologia dos sistemas frontais para o período de 1987 a 1995, utilizando análises de cartas sinóticas. Mais recentemente, alguns estudos para estabelecer uma climatologia dos sistemas frontais na América do Sul têm sido realizados usando dados de reanálises do NCEP/NCAR como em Justi e Silva Dias (2002) e Cavalcanti e Kousky (2003). Todos os trabalhos anteriores mostraram que a frequência de frentes frias diminui com o decréscimo da latitude, e que há uma variabilidade sazonal significativa.

Para entender a variabilidade do tempo na Amazônia faz-se necessário o conhecimento da dinâmica, do tipo, da intensidade, da estrutura e da duração das perturbações atmosféricas atuantes na região. No entanto, é preciso ter um conjunto de dados meteorológicos observados da região amazônica para serem analisados através de estatísticas adequadas na busca de se estabelecer as características e padrões dessas perturbações atmosféricas e com isso ajudar nas previsões de tempo.

A previsão de tempo nas regiões tropicais, em especial nas regiões equatoriais, é uma tarefa difícil. Isso se deve a três fatores: (1) falhas nos conceitos de previsão de tempo tropical que são diferentes do extratropical; (2) grande complexidade da dinâmica e física do escoamento atmosférico nos trópicos; e (3) pouca variabilidade temporal e espacial das

variáveis atmosféricas como temperatura e pressão. Nos trópicos a temperatura oscila pouco, tanto na escala diurna quanto na escala de semanas e meses, em comparação com os extratropicos. Por exemplo, através de observações dos dados do INMET para Manaus, observa-se que a amplitude diurna da temperatura em Manaus é da ordem de apenas 8°C e a pressão atmosférica varia pouco nos trópicos, apenas 1 a 2 hPa em milhares de km.

Todavia, a variabilidade temporal da precipitação é grande. Observam-se, frequentemente, chuvas de 40 mm num dia e nenhuma chuva no outro, devido a atividades convectivas organizadas e desorganizadas. A variação espacial da chuva também atinge valores altos. As frentes frias que afetam a região sul da Amazônia contribuem para esta variabilidade (Marengo, 1997).

O objetivo do presente trabalho é traçar um perfil atmosférico quando da passagem e evolução desses sistemas frontais e também simular e avaliar a sua evolução, através do modelo regional Eta. O sistema de observação meteorológico apresenta deficiências para uma previsão de qualidade e com isso as condições iniciais para os modelos numéricos atmosféricos também são deficientes. Os modelos numéricos de tempo têm avançado muito nos últimos anos através do desenvolvimento computacional e tornaram-se mais rápidos, robustos e baratos. Hoje é possível rodar rotineiramente modelos de alta resolução, bem como sistemas de previsão por conjuntos, tanto regionais como globais. Através desses modelos são realizadas as simulações de cenários futuros e a validação das previsões. Estudos recentes de Bustamante (2005), Chou (2007), Vasconcelos (2010) e outros, motivaram a escolha do modelo Eta que será usado na parte experimental do trabalho.

1.2. HIPÓTESES

- i. As frentes frias influenciam o tempo e sua variabilidade na Amazônia;
- ii. A convergência de umidade associada à situação de frentes frias contribui para a elevada precipitação na Amazônia quando comparadas a situações sem frentes frias.

1.3. OBJETIVOS

Nesta pesquisa pretende-se estudar a estrutura média da atmosfera associada a passagens de frentes frias na região central e sul da Amazônia Brasileira através de suas principais variáveis atmosféricas e investigar a acurácia do modelo regional Eta em recriar os processos físicos e dinâmicos de escala sinótica envolvidos na evolução e passagens desses sistemas e também verificar o potencial de previsão de tais sistemas.

Os objetivos específicos seguem detalhados abaixo:

- a) Construir compostos atmosféricos das variáveis meteorológicas: Precipitação, Temperatura, Altura Geopotencial, Umidade, Vorticidade e Ventos para os episódios de passagens de frentes frias que atingiram a região de estudo no período de 2001 a 2010;
- b) Descrever a estrutura e a evolução das frentes frias sobre as regiões sul e central da Amazônia;
- c) Descrever as condições atmosféricas favoráveis à evolução e passagem de frentes frias na Amazônia através dos diagnósticos dos campos de deformação, gradiente térmico, advecção de temperatura e função frontogenética (Estudo de Caso);
- d) Determinar uma melhor parametrização convectiva para o modelo regional Eta na representação dos padrões locais associadas à formação das frentes frias sobre o domínio de interesse;
- e) Avaliar a eficiência do modelo regional Eta na simulação de um evento de frente fria na região Amazônia.

1.4. JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO

Fortes chuvas com grandes variabilidades na temperatura podem ocorrer quando há uma chegada de um sistema frontal frio na região Amazônica. A passagem desses fenômenos nesta região é muito menos frequente do que nos subtrópicos do Brasil. Quando ocorrem, causam tempo significativo e transtornos a população local (Cavalcanti, 1985). Uma previsão confiável com antecedência, identificando a chegada e a intensidade desses eventos pode auxiliar bastante a defesa civil no âmbito de minimizar os problemas.

Outro fator que motiva a pesquisa em pauta é que poucos trabalhos sobre essa temática, voltados para a região amazônica, foram desenvolvidos, deixando, dessa forma, um conhecimento deficiente por parte dos meteorologistas operacionais no que diz respeito à identificação de passagem desses sistemas frontais e também a simulação numérica desses fenômenos visando à previsão dos mesmos. O presente trabalho pode auxiliá-los no diagnóstico e na previsão desses distúrbios.

Recentemente, Ricarte (2012), desenvolveu a sua tese de doutorado sobre a mesma temática, estudando as variações no campo de Temperatura e pressão para a região sul da Amazônia. Este trabalho visa contribuir através da análise de diversos campos atmosféricos para que o diagnóstico possa vir auxiliar em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2.1. REFERENCIAL TEÓRICO

A região Norte do Brasil localiza-se numa área pouco atingida por sistemas frontais (FF) que afetam o Brasil constantemente, pois a área de passagem, formação e intensificação das mesmas é a região sul do país. Alguns desses sistemas que são responsáveis por mudanças bruscas de tempo chegam a atingir o sul da região Amazônica causando o fenômeno conhecido como friagem. As características de deslocamento e intensidade das frentes variam com a estação do ano e com outros fatores sinóticos atuantes no Atlântico Sul (Lemos e Calbete, 1996).

Uma frente fria se dá quando ocorre a passagem do ar frio por um determinado local substituindo o ar quente que existia antes. Isso se dá devido o ar frio, por ser mais denso, deslocar o ar quente (que é mais leve) e forçá-lo a subir para a média e baixa troposfera (veja fig. 2.1). Assim, sabe-se que a massa de ar pré-frontal é quente e a massa de ar pós-frontal é fria (Satyamurty, 1998).

Uma frente fria nos extratropicais avança com uma velocidade média de 10 m/s e é acompanhada das seguintes condições de tempo:

- a) A pressão atmosférica diminui antes da passagem, aumenta consideravelmente durante e logo após a passagem da FF;
- b) O vento muda de direção e sofre variação na sua intensidade;
- c) A temperatura aumenta ligeiramente antes e cai bruscamente após a passagem da FF;
- d) A umidade relativa do ar aumenta antes, mantém-se alta durante e diminui após a

passagem da frente fria.

Em geral, a inclinação da frente fria na vertical é bem acentuada comparada a da frente quente. À medida que o ar frio avança e vai substituindo o ar quente e úmido, a formação de nuvens vai aumentando e resulta em precipitação. Na figura 2.1 temos um esquema em corte de uma frente fria.

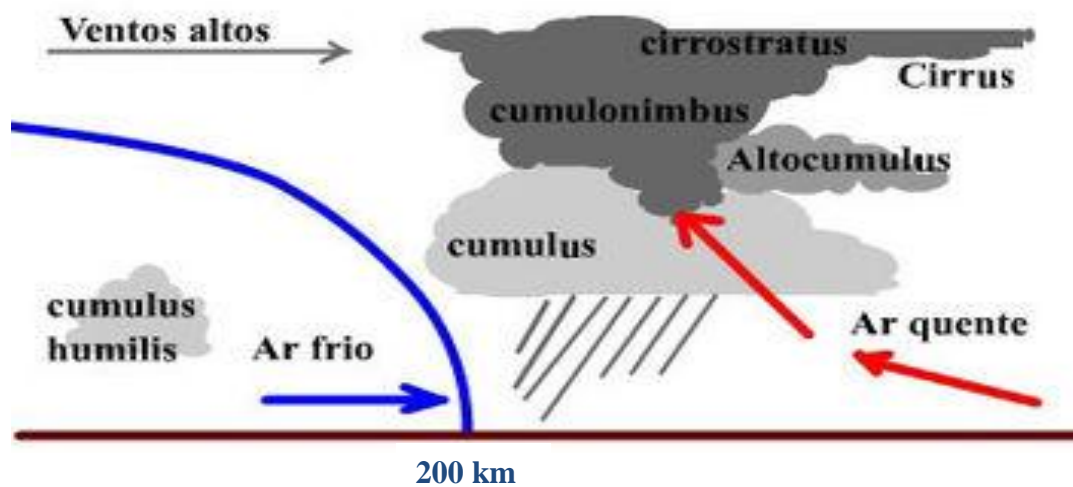


Figura 2.1: Visão esquemática mostrando a inclinação de uma frente fria e de uma frente quente e sua escala horizontal média.

Podem-se observar na troposfera fortes gradientes de temperatura e ventos que se concentram em zonas estreitas e, a estas faixas, estão associadas bastante atividades meteorológicas tais como nebulosidade e precipitação.

As frentes são fronteiras entre duas massas de ar que possuem densidades diferentes e apresentam comprimentos da ordem de 1000 km, escala transversal da ordem de 100 km e os ventos podem ultrapassar 50 m.s^{-1} . Também são encontrados, nos extratropicais, os seguintes

valores aproximados: gradiente de temperatura $\geq \frac{10K}{1000km}$; gradiente de umidade $\geq \frac{10 \text{ g.kg}^{-1}}{1000km}$;

vento $\geq 5 m.s^{-1}$ e cisalhamento $\geq 5 m.s^{-1} km^{-1}$. Pode-se ainda obter uma estimativa para a inclinação da frente utilizando a fórmula de Margules e aproximação do vento geostrófico. Com valores típicos observados do escoamento conforme representado na equação 2.1 a inclinação tem valores aproximados de 1/300 (Satyamurty, 1998).

$$\left(\frac{dz}{dy}\right)_f \sim \frac{[(10^{-4} s^{-1})(300K)(10m.s^{-1})]}{[(10m.s^{-2})(10K)]} = \frac{1}{300} \quad (2.1)$$

A interpretação desse resultado significa que uma superfície frontal é quase horizontal, supondo-se que uma frente em superfície encontra-se em São Paulo, então ela se encontra a uma altura aproximada de 1 km em Curitiba e a 2 km em Porto Alegre.

A formação ou intensificação de uma frente é chamada de frontogênese e o seu decaimento é chamado de frontólise. Matematicamente, define-se por:

$$F = \left(\frac{D}{Dt}\right) |\nabla \theta| \quad (2.2)$$

Que é a taxa de variação do gradiente de temperatura potencial θ , seguindo o movimento da parcela do ar.

Também pode ser escrita em coordenadas isobáricas, para uma situação em que a temperatura varia somente na direção norte-sul, pela equação 2.3 (Bluestein, 1993):

$$F = \left(\frac{D}{Dt}\right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)_p = \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)_p + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y}\right)_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial p}\right)_p - \left(\frac{1}{C_p}\right) \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{R}{C_p}} \left(\frac{\partial}{\partial y}\right) \left(\frac{dQ}{dt}\right) \quad (2.3)$$

Onde:

P_0 e P representam pressão em superfície e de referência, respectivamente. R é a constante do gás da atmosfera, C_p é o calor específico do ar à pressão constante. ω é a velocidade vertical

$$\frac{D\theta}{Dt} = \left(\frac{1}{C_p} \right) \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \left(\frac{dQ}{dt} \right), \quad \theta \text{ é a temperatura potencial e } \frac{dQ}{dt} \text{ é a taxa de}$$

aquecimento diabático.

O primeiro termo do lado direito é o efeito cinemático de confluência sobre o gradiente horizontal da temperatura, que tem o efeito de reduzir as distâncias entre as isotermas e dessa forma aumentar o gradiente térmico

O segundo termo é o efeito da variação meridional do movimento vertical sobre o gradiente vertical de temperatura e o terceiro termo é a variação horizontal do aquecimento diabático (radiação ou liberação do calor latente).

Se a massa de ar quente é aquecida e a massa de ar frio é resfriada então o gradiente de temperatura aumenta. Esses processos estão esquematizados na figura 2.2.

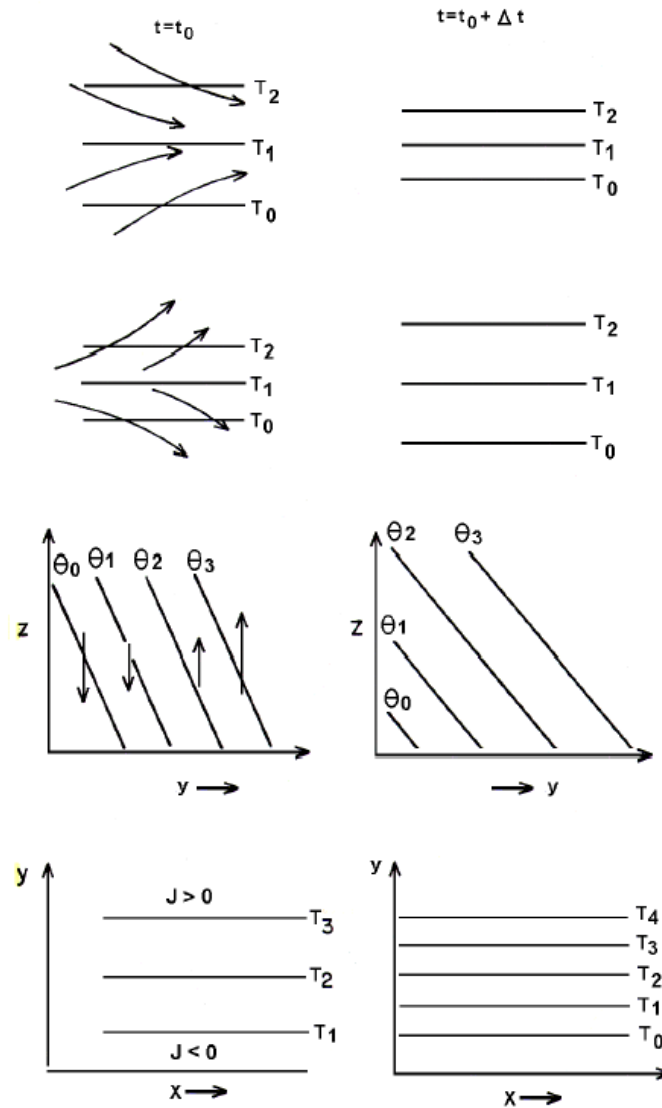


Figura 2.2: Processos cinemáticos que compactam ou afastam as isotermas. A coluna esquerda mostra as isotermas antes e a da direita após o compactamento, onde a variável $J = \frac{dQ}{dt}$. (Adaptada de Satyamurty, 2004).

Um escoamento horizontal na vizinhança imediata de um dado ponto pode ser decomposto em quatro partes: translação, divergência, rotação e deformação (Bluestein, 1993). Devido ao efeito cinemático dos campos de deformação e divergência o gradiente térmico no ponto pode aumentar criando uma zona frontal, ou diminuir, desintensificando uma frente. Este efeito é expresso pela função frontogenética de Petterssen:

$$F = \frac{1}{2} |\nabla \theta| (D \cos 2\beta - \delta) \quad (2.4)$$

Onde:

$$D = \left(\frac{\partial u'}{\partial x'} - \frac{\partial v'}{\partial y'} \right) \quad (2.5)$$

é a deformação resultante após a rotação de coordenadas de tal maneira que $\frac{\partial v'}{\partial x'} + \frac{\partial u'}{\partial y'} = 0$. Os primos denotam as velocidades e coordenadas rotacionadas.

β é o ângulo entre o eixo de dilatação do campo D e o gradiente de temperatura.

$\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ é a divergência que é invariante com respeito a rotação dos eixos.

Analisando a equação, observa-se que o efeito de deformação é frontogênético quando o eixo de deformação está entre -45° e $+45^\circ$ do gradiente de temperatura. Quando o ângulo β é maior que 45° e menor que 90° o efeito é frontolítico (veja figura 2.3). A convergência contribui para a frontogênese enquanto a divergência para a frontólise. Para maiores detalhes ver Bluestein (1993) e Satyamurty (2004).

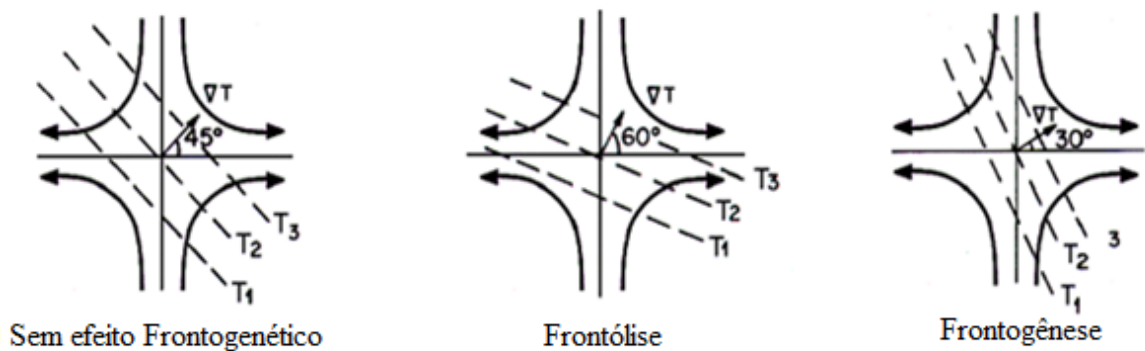


Figura 2.3: Ação do campo de deformação sobre o campo térmico para produzir frontogênese ou frontólise. (Adaptada de Satyamurty, 2004).

A vorticidade não afeta a frontogênese, pois o efeito cinemático da rotação é apenas girar a orientação das isotermas. É importante lembrar que o efeito do atrito é difundir os extremos de gradiente e, portanto é frontolítico.

A figura 2.4 apresenta várias frentes frias (FF) identificada na imagem de satélite destacando os centros de alta e baixa pressão.



Figura 2.4: Frente fria ocorrida em 11/07/2006 as 00:00Z. Os centros de alta e baixa pressão são indicados por A e B, respectivamente.

As áreas de baixa pressão, representadas pela letra B, são regiões de ar mais quente e úmido. Enquanto que as áreas de alta pressão, representadas pela letra A, são regiões de ar frio e seco. A área laranja na figura representa a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Três sistemas de FF são identificados, um deles afetando o Rio de Janeiro no dia 11 de julho de 2006.

A figura 2.5 mostra a imagem do satélite GOES, do dia 11 de fevereiro de 2009, às 15h45min do horário de Brasília, uma FF ativa, com a faixa de nuvens que se posiciona do Paraguai até os estados de Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul, estendendo-se para o

Oceano Atlântico. Na figura podemos observar claramente a zona de transição entre a massa de ar frio, sem nebulosidade, e ar quente com nebulosidade, característico de uma frente fria.

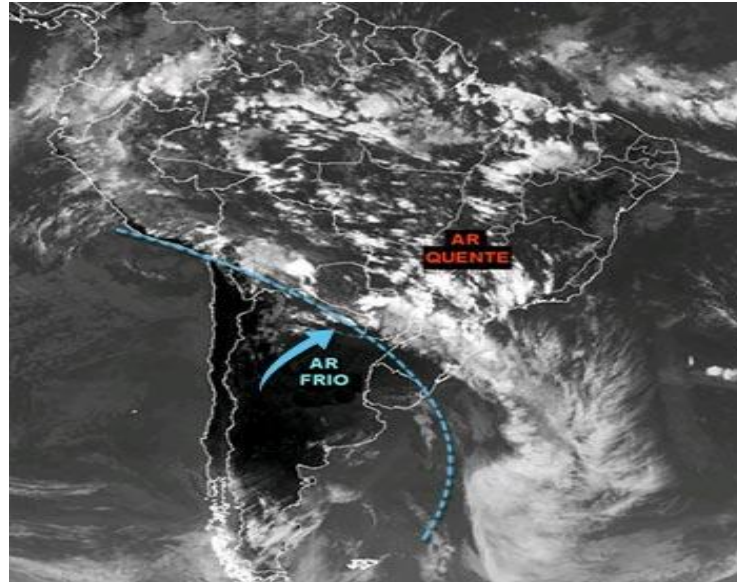


Figura 2.5: Imagem do Satélite GOES, em 11/02/2009, às 19:00Z mostrando a fronteira entre as massas de ar frio e quente.

A figura 2.6 é a imagem de satélite GOES mostrando outra situação real, em que há uma frente fria ativa no Nordeste.

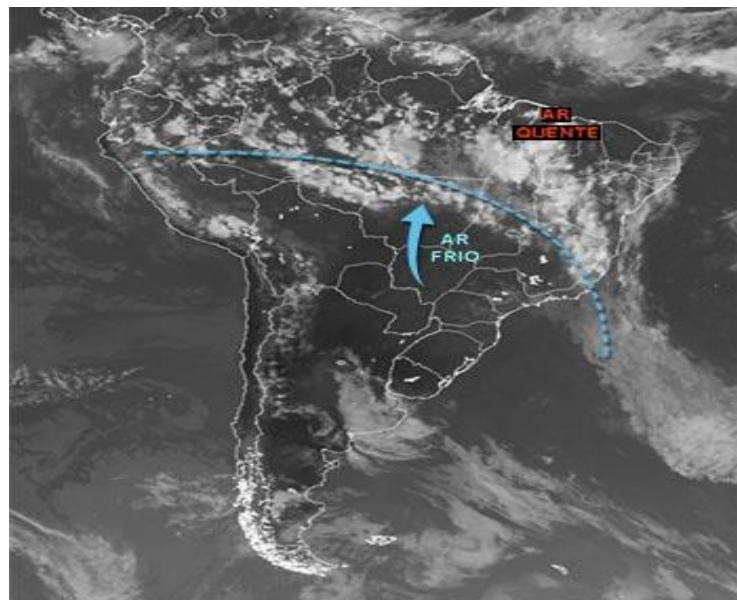


Figura 2.6: Imagem do satélite GOES em 06/01/2006 às 21:00Z de uma frente fria.

Os sistemas frontais eram e ainda podem ser identificados através de cartas sinóticas e também através de dados processados pelos modelos numéricos de previsão de tempo. Critérios utilizados para a identificação objetiva dos sistemas frontais podem ser: queda de temperatura, aumento de pressão ao nível médio do mar e mudança na componente meridional do vento em 925 hPa e 850 hPa. Critérios semelhantes foram utilizados por Cavalcanti e Kousky (2003).

A passagem dos sistemas frontais que causam frio na região Amazônica são mais frequentes no verão austral, ou seja, nos meses entre maio a setembro (Satyamurty 1998). De acordo com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), os resumos mensais "Climanálise" relatam que ocorrem 2 a 3 episódios de FF por mês, em média, nesse período, e desses alguns atingem a região norte. Estudos de Mattos (2003) revelaram as seguintes características gerais das FF:

- a) As frentes frias provenientes do sul ocasionalmente penetram meridionalmente no continente, ao norte de 10°S.
- b) As passagens frontais sobre a América do Sul estão associadas com o desenvolvimento de distúrbios baroclínicos na circulação geral do Hemisfério Sul e são influenciadas pela topografia dos Andes.
- c) Um centro de alta pressão sobre a Argentina, juntamente com o desenvolvimento de um cavado ou de um ciclone no Atlântico ao largo da costa da Argentina canalizam fortes ventos frios de sul na Argentina e no Brasil, causando friagem na Amazônia.

Pezza e Ambrizzi (2005) calcularam as trajetórias de ciclones e anticiclones em superfície, a partir do dia -10 ao dia 0, com relação ao dia mais frio em São Paulo e classificaram as ondas de frio em extrema, forte, moderada e fraca. Eles descobriram que a

maioria dos eventos de frio em São Paulo pode ser rastreada até nove dias antes da ocorrência.

Uma vez que as variabilidades temporais e espaciais da temperatura são pequenas, e a variabilidade sazonal de precipitação é bem estabelecida, na Amazônia, muitos acham que não há razão para se preocupar com previsões de tempo. A experiência diária aponta que, ao contrário que se pensa, existem episódios (ou dias) de chuva intensa e outros com pouca ou nenhuma chuva. Isso significa que na escala de alguns dias existe variabilidade de parâmetros meteorológicos como chuva, nebulosidade e ventos. Além disso, os dias nublados apresentam temperaturas máximas menores que os dias com céu aberto. Assim, de fato, existe variabilidade na escala de tempo de dias a ser prevista na Amazônia pela meteorologia.

Estudos de Angelini (2002) e mais recentemente Angelini et al. (2010) mostram que cerca de 80% da chuva na Amazônia é produzida pelas circulações associadas com sistemas sinóticos, tais como frentes frias e 20% pela atividade convectiva desorganizada. Estes resultados reforçam a importância do entendimento da física e dinâmica dos sistemas sinóticos na Amazônia, entre eles, as frentes. Outros estudos como o de Lima (2010) mostraram diferenças na intensidade e na estrutura das perturbações sinóticas entre episódios com chuva forte e episódios com chuva normal para a Região Sudeste do Brasil, motivando assim ainda mais a nossa pesquisa.

2.2. CLIMATOLOGIA DA REGIÃO AMAZÔNICA

A Amazônia está situada na região equatorial e possui um clima quente e úmido. O clima atual da região Amazônica se deve a uma combinação de vários fatores, sendo que o mais importante é a disponibilidade de energia solar, através do balanço de energia. A Amazônia, situada na região entre 5°N e 10°S, recebe no topo da atmosfera um valor máximo de 36,7 MJ.m⁻².dia⁻¹ em dezembro/janeiro e um valor mínimo de 30,7 MJ.m⁻².dia⁻¹ em

junho/julho (Salati e Marques, 1984), valores estes que são reduzidos pela transmissão através da atmosfera, chegando em média, $15 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ à superfície. Medidas realizadas na Amazônia Central (Manaus-AM) indicam que as máximas de radiação que chegam à superfície ocorrem nos meses de setembro/outubro e os mínimos ocorrem nos meses de dezembro à fevereiro. Esta distribuição é controlada pela nebulosidade (Fisch, 1996).

Em função dos altos valores de energia que incidem na superfície e pouca variabilidade sazonal, a temperatura do ar é elevada e apresenta apenas uma pequena variação ao longo do ano, com exceção da parte mais ao sul (Rondônia e Mato Grosso) que sofre a ação de sistemas frontais (denominados localmente por Friagens). A amplitude térmica sazonal é da ordem de $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que os valores médios diários situam-se entre $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Especificamente, Belém (PA) apresenta a temperatura média mensal máxima de $26,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em Novembro e a mínima temperatura de $25,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em março (Fisch, 1996). Manaus, por outro lado, possui seus extremos de temperatura nos meses de setembro ($27,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e abril ($25,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

A região Amazônica possui uma precipitação média de aproximadamente 2300 mm.ano^{-1} , embora tenham regiões (na fronteira entre Brasil e Colômbia e Venezuela) em que o total anual atinge 3500 mm . Nestas regiões não existe período de seca. Estes valores de precipitação elevada próximo à Cordilheira dos Andes devem-se à ascensão orográfica do ar úmido transportado pelos ventos alísios de leste ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figuerola e Nobre, 1990).

Na região costeira (no litoral do Pará ao Amapá), a precipitação também é alta e sem período de seca definido, devido à influência das Linhas de Instabilidade (LI) que se formam ao longo da costa litorânea durante o período da tarde e que são forçadas pela brisa marítima. A distribuição espacial e temporal das chuvas na Amazônia foi detalhadamente estudada por Figuerola e Nobre (1990), utilizando dados de 226 estações pluviométricas, e por Marengo

(1995), que usou dados da atividade convectiva (Radiação de Ondas Longas) do International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP).

O máximo da chuva na região central da Amazônia (próximo de 5°S) pode estar associado com a penetração de sistemas frontais da região sul, interagindo e organizando a convecção local (Marengo, 1995). O período de forte atividade convectiva na região Amazônica é compreendido entre novembro e março, sendo que o período de relativa seca (sem grande atividade convectiva) ocorre entre os meses de maio e setembro. Os meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro. A distribuição de chuva no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro (DJF) apresenta uma região de precipitação alta (superior a 900 mm) situada na parte oeste e central da Amazônia, ligada a posição geográfica da Alta da Bolívia. Por outro lado, no trimestre junho-julho-agosto (JJA), o centro de máxima precipitação desloca-se para o norte e situa-se sobre a América Central. Durante o trimestre, a região Amazônica, principalmente a parte central, está sobre o domínio do ramo descendente da Célula de Hadley, induzindo um período seco bem característico. Kousky e Kayano (1981) sugeriram que a distribuição de chuvas na Amazônia esteja relacionada com a posição da Alta da Bolívia. Em relação à água precipitável, é praticamente constante ao longo do ano com valores entre 55 mm e 60 mm, com pequenos desvios negativos nos meses de seca.

A atividade convectiva na região Amazônica é um importante mecanismo de aquecimento da atmosfera tropical e exerce um papel importante na determinação do tempo e clima desta região. A energia incidente é transferida para a atmosfera essencialmente pelo fluxo de calor latente. No processo convectivo úmido o calor latente é liberado e aquece a atmosfera (Fisch, 1996).

Sobreposta à situação climática da região, existem perturbações de curto prazo devido a atuação de frentes frias, que é o assunto do presente estudo.

CAPÍTULO 3

3.1. DADOS E METODOLOGIA

3.1.1. Dados

Primeiramente, fez-se uma climatologia das frentes frias que se deslocaram sobre as regiões sul e central da Amazônia e que atingiram a cidade de Manaus para um período de 10 anos. Para esta climatologia foram usados os dados diários de reanálise provenientes do NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research), para o período de 2001 a 2010. Em seguida, para a confirmação desses eventos observou-se as imagens do satélite GOES no canal infravermelho disponíveis no CPTEC/INPE. Também se utilizou dados de precipitação da rede de estações de superfície do INMET para avaliar a chuva ocorrida em Manaus durante esses eventos.

Para a análise dos campos meteorológicos associados às frentes frias utilizou-se dados de reanálise do NCEP/NCAR, pois segundo Kalnay et al. (1996), as reanálises do NCEP/NCAR são consideradas uma base de dados meteorológicos das mais completas e consistentes na atualidade. Também foi consultado o banco de dados do TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), aqui usado para avaliar a distribuição espacial e temporal da precipitação simulada pelo modelo regional Eta.

A metodologia utilizada para a identificação dos episódios de frentes frias baseou-se nos estudos de Cavalcanti e Kousky (2003) que avalia a variação da temperatura, da pressão, da componente meridional do vento. Os critérios utilizados aqui, consistiram na variação de temperatura e na mudança da intensidade e sentido da componente meridional do vento, sendo o mesmo positivo quando aponta para o norte e negativo no sentido contrário,

conforme as condições 3.1.

$$\left. \begin{array}{l} (i) T_{d-1} - T_d \geq 2^\circ C \\ (ii) v_{d-1} - v_d \geq 2 m.s^{-1} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Onde T e v são, respectivamente, temperatura mínima e a componente meridional do vento (positiva) em Manaus. Os índices $d-1$ e d indicam os dias anterior e da ocorrência do evento, respectivamente.

Vale ressaltar, para não causar confusão que, a friagem, como é conhecida pela população local, é a consequência da passagem da frente fria. A Frente Fria é uma zona estreita que separa as duas massas de ar num determinado momento. Quando se descreve o evento em termos de campos meteorológicos associados, está se relacionando à frente fria.

3.1.2. Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho é apresentada em duas partes: a primeira se refere ao estudo observacional da estrutura média da atmosfera durante a ocorrência das frentes frias que chegaram às regiões sul e central da Amazônia e atingiram a cidade de Manaus, onde se busca descrever a evolução dos campos compostos das variáveis meteorológicas: Temperatura, Altura Geopotencial, Vento, Divergência de Umidade e Precipitação, nos níveis de 925 hPa, 850 hPa e 200 hPa.

Obteve-se, para estes eventos, os compostos de frente fria que ocorreram durante o verão austral. A escolha desses meses para o estudo da climatologia das frentes frias se deve a maior frequência das mesmas ocorrer nesse período (Andrade, 2005; Cavalcanti, 1985; Satyamurty et al., 1998, Seluchi et al., 1998).

A segunda parte trata-se do estudo experimental, utilizando o modelo Regional Eta para simular um estudo de caso de frente fria que ocorreu no período de 14 a 17 de julho de 2010, na qual a friagem ocorreu em Manaus no dia 17. O objetivo deste experimento numérico é avaliar a física do modelo no que se refere aos parâmetros de convecção cúmulus (rasa e profunda) usando as parametrizações Betts-Miller (BM) e Kain-Fritsch com fluxo de momento (KFm), em busca daquela que melhor represente a atmosfera durante a ocorrência de uma friagem na Amazônia.

A partir das análises estatísticas, Erro Médio (EM), Erro Médio Quadrático (REQM) e Eficiência, que serão detalhadas posteriormente, dos campos obtidos das observações e das simulações, objetiva-se a obtenção de uma performance do Modelo Eta em recriar eventos de FF na Amazônia.

Ainda neste estudo de caso, realizou-se um diagnóstico de friagem através dos campos

de deformação, gradiente térmico, advecção de temperatura e frontogênese (frontólise) através da função frontogenética de Petterssen (Bluestein, 1993).

3.2. ESTUDO OBSERVACIONAL DOS EPISÓDIOS DE FRENTES FRIAS

A área de estudo compreende a região sul e central da Amazônia, limitada pelas latitudes 15° S e 5° N e longitudes 75° W e 55° W, e está representada na figura 3.1.

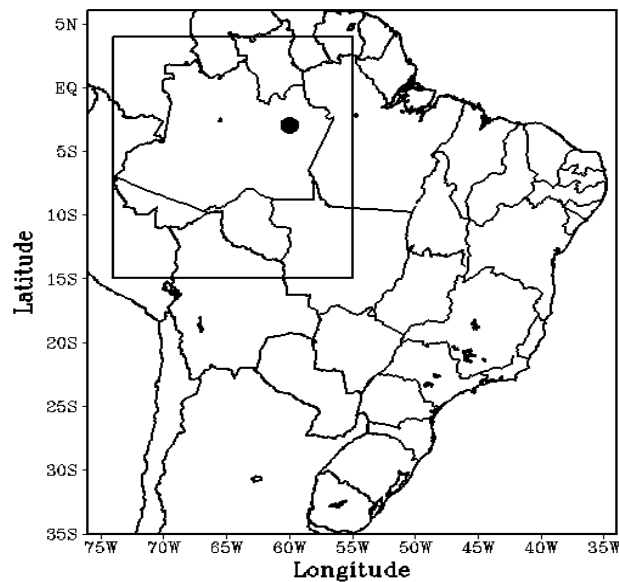


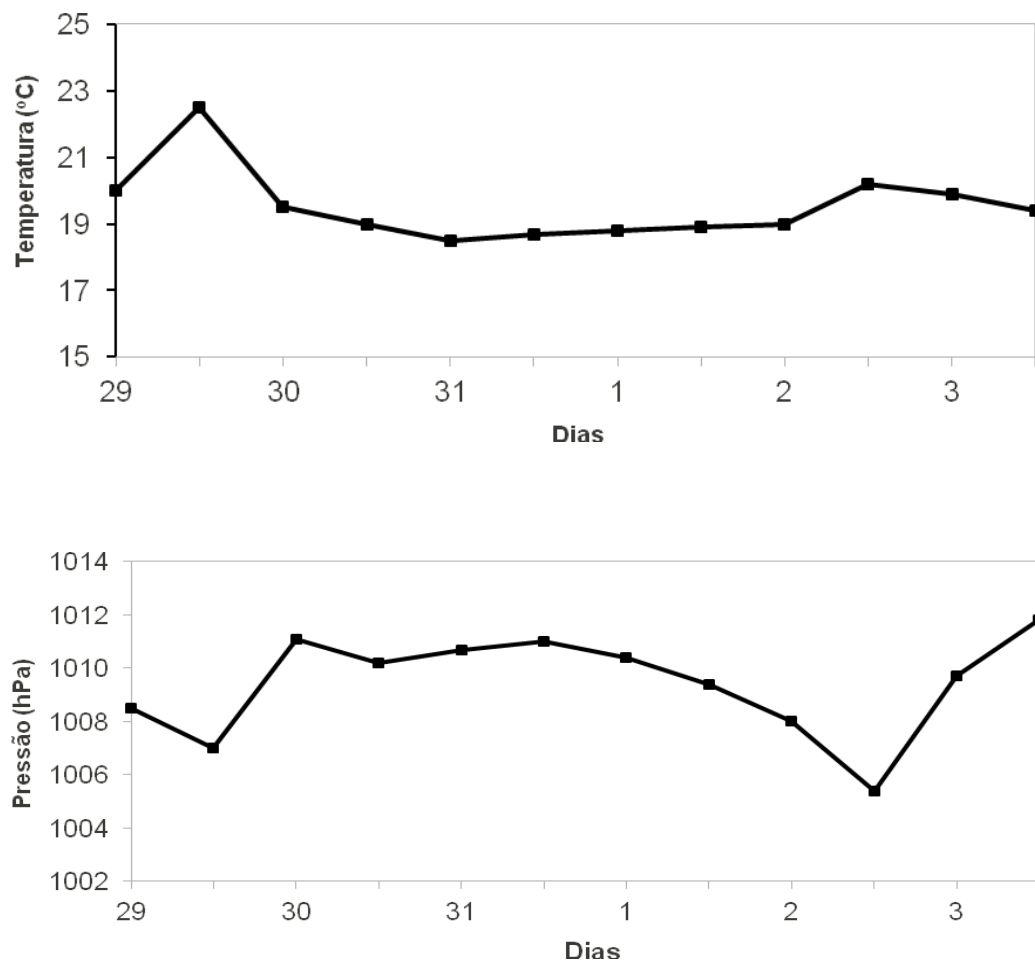
Figura 3.1: Mapa do Brasil com destaque para a área de estudo.

Ressalta-se que na identificação dos casos de frentes frias ocorridas no período de 2001 a 2010 os boletins climanalise do CPTEC e imagens de satélites GOES no canal IR foram consultados. Os dados de Temperatura e Precipitação da estação meteorológica de Manaus do INMET foram utilizados para avaliar a precipitação ocorrida em Manaus durante esses eventos de Frentes que causaram friagem na região.

A identificação da passagem de um sistema frontal frio é baseado nas variações da Pressão ao Nível do Mar (PNM), da temperatura e na componente meridional do vento. No entanto, nas regiões tropicais, que são pouco afetadas por frentes frias, percebe-se que

algumas variáveis, como a pressão ao nível médio do mar, apresentam variações bem menores que nos extratropicos e dessa forma não representa um bom indicador para identificação desses distúrbios sobre a região. Dessa forma, a mesma não foi levada em consideração no critério para a identificação das frentes frias.

Para exemplificar, tem-se as variações observadas durante a passagem de uma frente fria ocorrida no período de 29 de julho a 03 de agosto de 2011 sobre São Paulo está mostrado na figura 3.2. Para tanto se utilizou os dados diários do INMET da Temperatura, Umidade e da Pressão e dessa forma, mostrar o comportamento dessas variáveis na identificação de um sistema frontal frio.



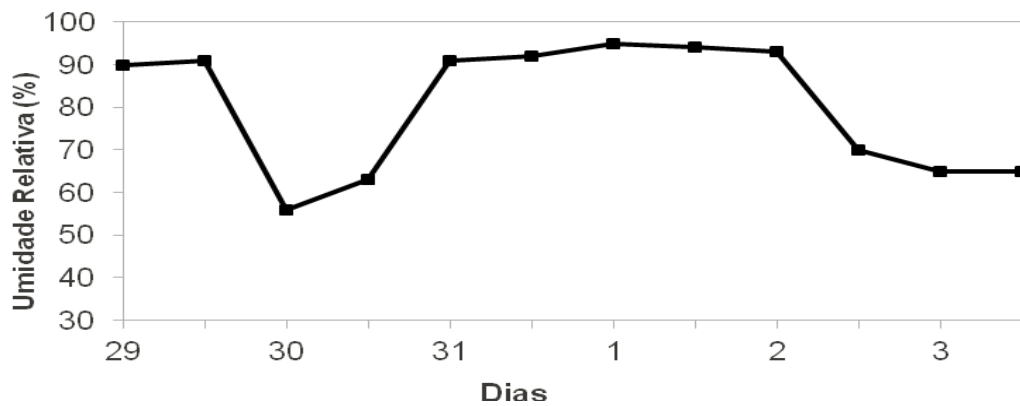
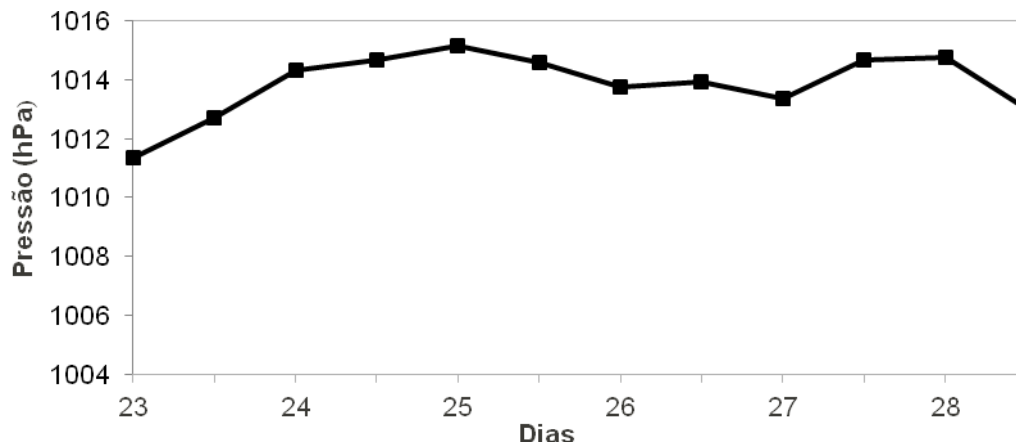
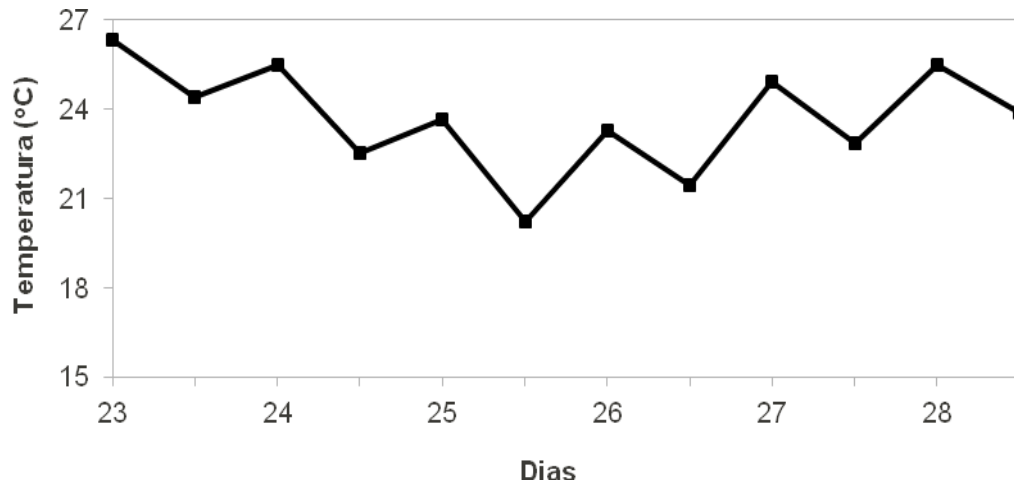


Figura 3.2: Evolução da Temperatura, Pressão e Umidade durante um evento de passagem de frente fria em São Paulo ocorrida entre julho e agosto de 2011. Dados plotados em intervalos de 12 horas (00 e 12 TMG).

Nesse período houve, de fato, a passagem de duas frentes frias, uma no dia 29 de julho e outra no dia 2 de agosto de 2011. Acompanhando-se as variáveis nota-se que no dia 29 às 12 TMG, a temperatura aumenta 3°C e a pressão cai aproximadamente 2 hPa enquanto que a umidade permanece alta e constante. Nas próximas 12h a temperatura cai 4°C , a pressão aumenta 5 hPa e a umidade cai de 90% para 50%, sinal de entrada de massa de ar frio e seco. Tem-se praticamente a mesma sequência, com menor intensidade, entre os dias 02 e 03.

Para comparar a passagem de uma frente fria no sudeste e na Amazônia, a figura 3.3 mostra o comportamento das variáveis temperatura, pressão e umidade relativa para um evento ocorrido em entre 23 e 28 de maio de 2007. Observa-se que, quanto a variabilidade de temperatura e umidade, tem-se um comportamento semelhante ao ocorrido em São Paulo. Tem-se que uma queda de aproximadamente 6°C entre os dias 23 e 25 (dia da ocorrência do evento) e a partir do dia 26 começa a subir gradualmente. Nesse período, a umidade relativa mantém-se elevada, em torno de 95%, indicando a ocorrência de chuva. Quanto a pressão observa-se pouca variação nas 24h que precedem a chegada da frente, diferentemente do evento anterior que atingiu São Paulo onde a mesma apresenta uma significativa

variabilidade. Isso justifica o motivo pela qual não se utilizou da mesma como critério de identificação de friagem na Amazônia, pois a mesma não representa um bom indicativo de chegada de sistemas frontais na região.



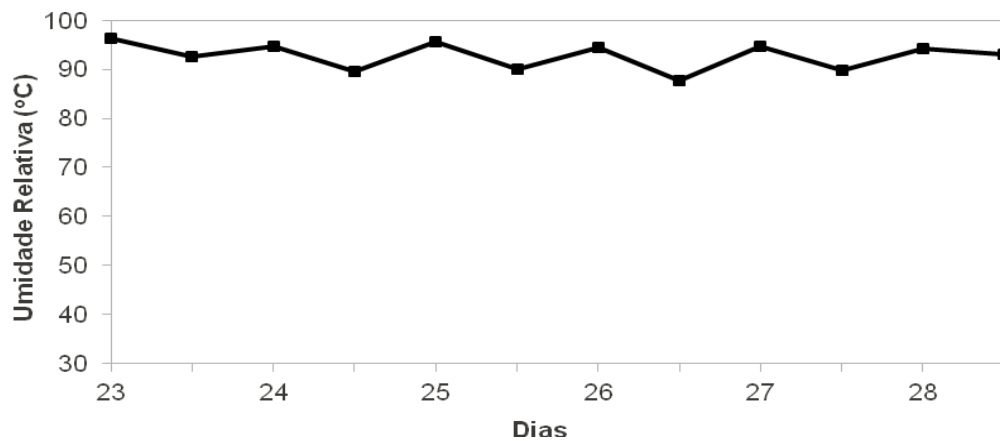


Figura 3.3: Evolução da Temperatura, Pressão e Umidade durante um evento de passagem de frente fria que atingiu a região Amazônica em Maio de 2007. Dados plotados em intervalos de 12 horas (00 e 12 TMG).

3.3. CAMPOS COMPOSTOS

Para os casos de frente fria na região de estudo construiu-se os campos compostos da seguinte maneira:

Seja $\psi(i, j, d, n)$ uma variável meteorológica num determinado nível. Onde (i, j) são índices latitudinal e longitudinal dos pontos de grades, respectivamente; d relaciona-se ao dia da ocorrência da frente fria e n é número do evento em questão, sendo $n = 1, 2, 3, \dots, N$ e $d = -3, -2, -1, 0, +1, +2$. Os dias $d = -1$ e $d + 1$, por exemplo, representam o dia anterior e posterior ao dia da ocorrência da frente fria, respectivamente.

Define-se a função composição dos campos atmosféricos conforme segue:

$$\psi_c(i, j, d) = \frac{1}{N} \sum_1^N \psi(i, j, d, n) \quad (3.1)$$

Onde $\psi_c(i, j, d)$ representa campo de composição da variável meteorológica do

estudo no nível desejado para o dia d em relação à passagem da frente fria.

3.4. DIAGNÓSTICO DE EVOLUÇÃO DE FRIAGENS

3.4.1. Convergência de Umidade

A Divergência de Umidade é definida por:

$$Div(q) = \nabla \cdot (qV) = \frac{\partial(qu)}{\partial x} + \frac{\partial(qv)}{\partial y} \quad (3.2)$$

Onde $V = \vec{i}u + \vec{j}v$ é o vento e q é a Umidade Específica. Quando $Div(q) < 0$ tem-se a convergência, caso contrário, divergência. A umidade é máxima e, portanto a convergência de umidade é substancial na baixa troposfera.

3.4.2. Campo de Deformação

É uma característica do movimento do fluido que deforma um elemento, sem aumentar ou diminuir seu volume ou sem rotacioná-lo. Na atuação de um escoamento deformativo a parcela sofre uma dilatação ao longo de uma direção e contração na outra permanecendo inalterado seu volume, caracterizando os eixos de dilatação e contração, respectivamente. A deformação horizontal pode ser medida pelas equações 3.2.

$$D_1 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{e} \quad D_2 = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.2)$$

Onde u e v são componentes zonal e meridional de vento, respectivamente. Vale ressaltar que quando $D_1 = 0$ a dilatação dos eixos coincide com o eixo x para $D_2 > 0$, e com o eixo y quando $D_2 < 0$. A orientação do eixo se apresenta de nordeste para sudoeste se $D_1 > 0$,

e de nordeste para sudeste se $D_1 < 0$ quando $D_2 = 0$.

Para eliminar uma das partes da deformação, é conveniente rotacionar os eixos x, y por um ângulo α . Nesse caso $D = \frac{\partial u'}{\partial x'} - \frac{\partial v'}{\partial y'}$ mede a deformação, sendo que $\frac{\partial v'}{\partial x'} + \frac{\partial u'}{\partial y'} = 0$ (ver eq. 2.5).

A unidade de deformação é expressa por s^{-1} . Uma característica nas frentes frias é que as mesmas são orientadas ao longo dos eixos de contração, resultado que iremos discutir em capítulos posteriores.

3.4.3. Gradiente Térmico

É um operador vetorial representado por

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k \quad (3.3)$$

Onde i, j, k são vetores ortogonais nas direções x, y, z respectivamente. A orientação do gradiente é na direção em que ocorre a maior taxa de variação, e o seu módulo é essa taxa. Em situações de frentes frias o gradiente térmico aumenta na direção e sentido do deslocamento da massa de ar frio ou perpendicular a frente fria.

Sabe-se que $\left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|$ é muito maior que $\left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|$ ou $\left| \frac{\partial T}{\partial y} \right|$. Assim, avalia-se o gradiente de temperatura horizontal, definido pela sua magnitude e sua direção com respeito ao eixo x , β , são definidos por:

$$|\nabla T|_h = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad \text{e} \quad \beta = \arctg\left(\frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{\frac{\partial T}{\partial x}}\right) \quad (3.4)$$

3.4.4. Advecção Térmica

As variações de temperatura que acompanham um evento de friagem na região Amazônica se devem ao processo advectivo, isto é, a temperatura na Amazônia diminui por causa do movimento do ar frio, oriundo do sul, na direção da região. Em uma superfície isobárica (pressão = cte) as isotermas de T coincidem com as θ (temperatura potencial). A equação termodinâmica, sem os efeitos diabáticos, pode ser escrita:

$$\left.\frac{d\theta}{dt}\right|_p = 0 \rightarrow \left.\frac{dT}{dt}\right|_p = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbb{V} \cdot \nabla T \quad (3.5)$$

O lado esquerdo da equação é a tendência térmica em um dado local (como por exemplo, Manaus) e o lado direito é o processo advectivo, causa da tendência. Os efeitos advectivos são calculados e discutidos em capítulos posteriores.

3.4.5. Função Frontogenética de Petterssen

Teoricamente um compactamento de isotermas ou aumento do gradiente térmico é uma área de frontogênese. O contrário, ou seja, o descompactamento ou enfraquecimento do gradiente de temperatura é a frontólise. A função frontogenética de Petterssen (Bluestein, 1993) é dada por:

$$F = \frac{1}{2} |\nabla \theta| (D \cos 2\beta - \delta) \quad (3.6)$$

Onde:

D é a deformação resultante do escoamento, expresso em s^{-1} , descrita na seção 3.4.1.

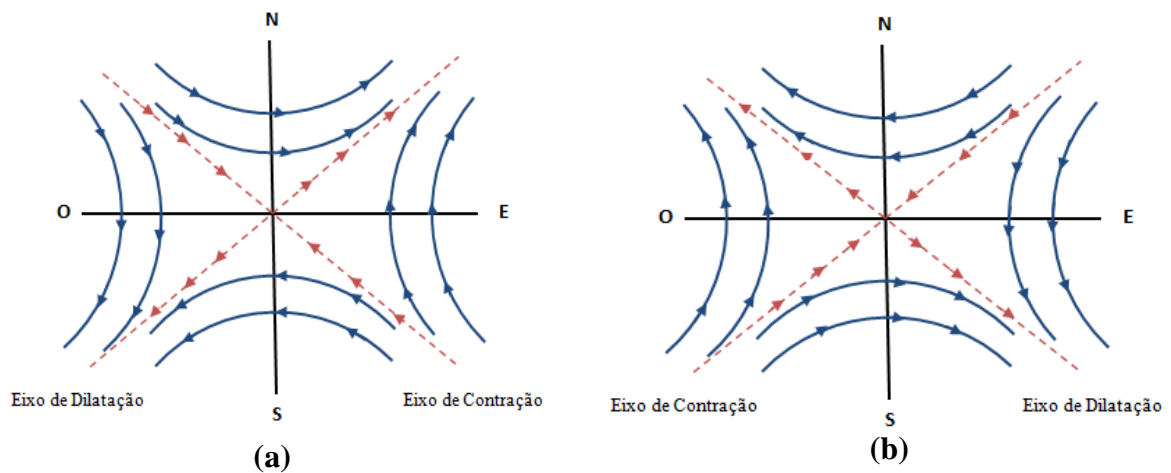
β é o ângulo entre o eixo de dilatação D e o gradiente de temperatura e $\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ é a

divergência horizontal. A partir daí calcula-se a função frontogénica em 3.6.

Quando F é positiva, as isotermas tendem a se compactarem, um processo adequado a ocorrência de frontogênese; quando F é negativa temos frontólise.

As partes do campo de deformação $D_1 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ e $D_2 = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ são

esquematisadas na figura 3.4.



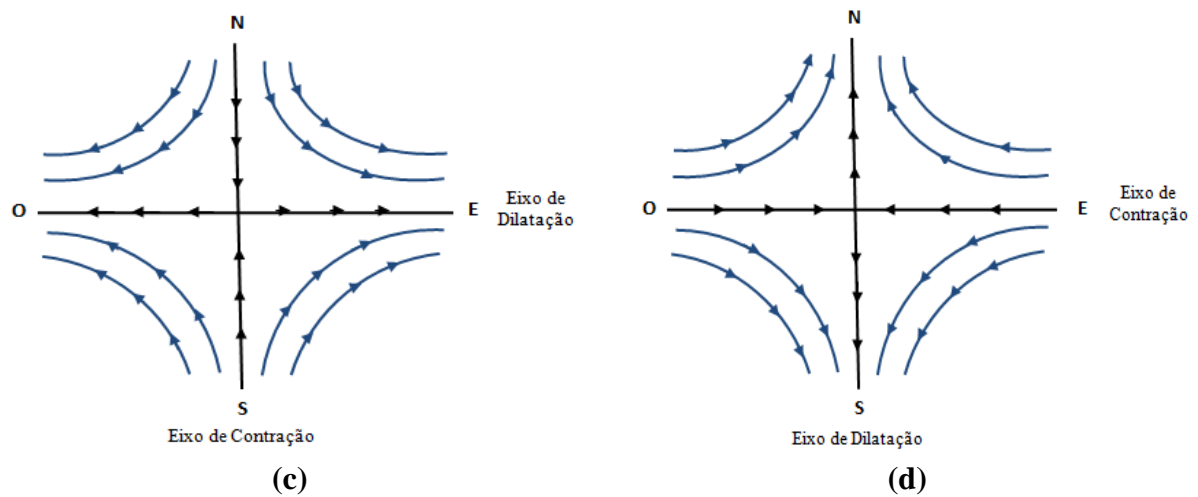


Figura 3.4: Esquematização dos campos de deformação nos casos em (a) $D_2 = 0$ e $D_1 > 0$; (b) $D_2 = 0$ e $D_1 < 0$; (c) $D_1 = 0$ e $D_2 > 0$ e (d) $D_1 = 0$ e $D_2 < 0$.

As configurações esquematizadas nos painéis 3.4 (c) e (d) são raras, especialmente nas situações de frentes frias sobre a parte central da América do Sul.

As observações do escoamento (vento) na baixa troposfera na América do Sul apresenta-se com as características semelhantes a $D_1 < 0$ conforme figura 3.5.

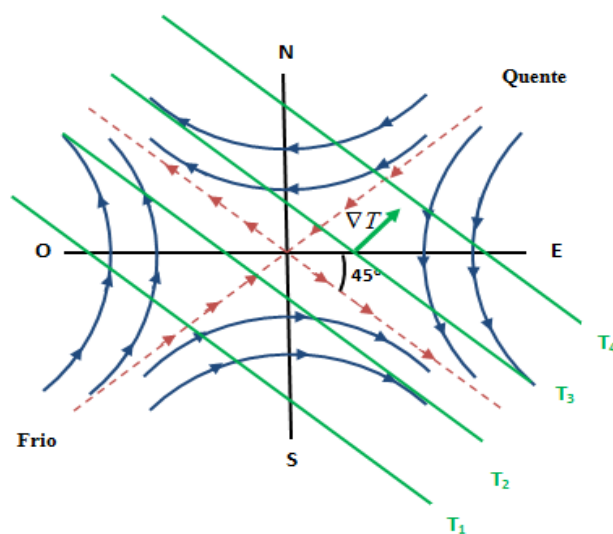


Figura 3.5: Esquema do campo de deformação do escoamento na América do Sul. As isothermas estão representadas de tal forma que $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.

Portanto, na prática, calcula-se D_1 e considera-se o ângulo entre seu eixo de dilatação com respeito ao eixo x igual a -45° . O ângulo entre o gradiente térmico ∇T e o eixo x é designado α . Sendo assim, o ângulo agudo entre o eixo de dilatação e o gradiente térmico é dado por $\beta = \alpha - 45^\circ$ é utilizado na função frontogenética de Petterssen (Eq. 3.6).

Em todos os cálculos, as seguintes diferenças centradas foram utilizadas para o campo de deformação:

$$D_1(i, j) = \frac{1}{2} \left[\frac{(v(i+1, j) - v(i-1, j))}{\Delta x} + \frac{(u(i, j+1) - u(i, j-1))}{\Delta y} \right] \quad (3.7)$$

Onde D_1 é uma das componentes de deformação no ponto $x = i\Delta x$ e $y = j\Delta y$, onde Δx e Δy são os espaçamentos de grade zonal e meridional, respectivamente. No caso de dados de reanálise do NCEP/NCAR utilizadas, $\Delta x = 2,5^\circ \times 110 \times 10^3 \text{ m/}^\circ \text{ long(lat)}$. Apesar desse espaçamento entre esses pontos de grade ser grande, o mesmo consegue identificar os sistemas pois a nossa área de estudo compreende 20° de latitude por 20° de longitude aproximadamente.

CAPÍTULO 4

4.1. MODELO REGIONAL ETA

O Eta, modelo de área limitada, foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e tornou-se operacional no National Center Environmental Prediction (NCEP) (Mesinger et al., 1988; Black, 1994).

Através do modelo é possível recriar com maior resolução (que no modelo global) os campos associados aos eventos de frentes frias. Segundo Tanajura et al (2003) e Chou e Silva (1999) as previsões apresentam resultados melhores que os modelos globais próximo à regiões de montanha, principalmente com relação a melhor distribuição da temperatura de superfície e da precipitação.

A nova versão do modelo regional Eta (Mesinger, 2012) em funcionamento no CPTEC apresenta as seguintes características:

(1) As variáveis prognósticas do modelo são: Temperatura do ar, componentes zonal e meridional do vento, umidade específica, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

(2) O esquema de superfície (interação solo-vegetação-atmosfera) do modelo é o Noah Land Surface Model (Chen et al., 1997);

(3) O esquema de parametrização de radiação de ondas longas (Fels e Schwarzkopf, 1975) e curtas (Lacis e Hansen, 1974) foi desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Esses esquemas são acionados a cada hora de previsão.

(4) A parametrização de cúmulus pode ser realizada pelos esquemas de Betts-Miller (1986) ou Kain-Fritsch (1990);

(5) O esquema de microfísica de nuvens é o Ferrier Microphysics (Ferrier et al., 2002);

(6) Esquema de turbulências de Mellor e Yamada 2.5 (Yamada, 1982);

A versão do modelo regional Eta utilizada nesse estudo também inclui as seguintes atualizações:

Esquema linear de advecção vertical;

Água líquida no cálculo da Pressão em Superfície;

Parametrização de Kain-Fritsch com fluxo de momentum;

Saídas do vento em 50 e 100 m;

Novo mapa de solo sobre a América do Sul;

Para maiores detalhes sobre estrutura da grade no modelo Eta e os campos associados

As parametrizações de difusão turbulenta, cúmulos, radiação e de microfísica ver Chou (2007) e Rozante (2008).

4.2. ESTRATÉGIA DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

Embora a região de estudo esteja compreendida em 15° S – 5° N e 75° W – 55° W, configurou-se o modelo com uma única grade na resolução de 40 km, com domínio espacial de 15° N – 50° S e 25° W – 90° W, cobrindo a América do Sul. A atualização é feita a cada 6 horas de integração e as condições de bordas são obtidas das saídas das reanálises do NCEP/NCAR.

Escolheu-se, para a realização dos experimentos, um caso de friagem que atingiu a cidade de Manaus no período entre 12 a 19 de julho de 2010 e que se destacou devido sua intensidade principalmente na temperatura e também por ser o mais recente dentro do

intervalo de tempo do estudo, a saber de 2001 a 2010.

Considerou-se o dia da ocorrência do episódio ($d = 0$) aquele que apresentou menor temperatura, em Manaus, no período da evolução da FF, e este dia foi representado por D. Os quatro dias que antecedem e os três dias que sucedem o evento são designados por (D-4, D-3, D-2, D-1) e (D+1, D+2, D+3), respectivamente. Para o episódio realiza-se 04 rodadas de integração do modelo. Na primeira simulação o modelo rodou no período D-4 até D+3 do evento. A segunda simulação ocorreu entre os dias D-3 ao D+3 e assim sucessivamente até o dia D-1 ao D+3. Dessa forma, acredita-se que seja possível identificar o dia a partir do qual o modelo consegue recriar satisfatoriamente o evento de frente fria.

As variáveis de saída do modelo que serão analisadas são: Precipitação, Temperatura em superfície, Umidade Relativa e Pressão ao nível médio do mar. As rodadas iniciam-se às 12 horas TMG (Tempo Médio Greenwich). A condição inicial de água no solo é fornecida por um modelo hidrológico do CPTEC. Utiliza-se a temperatura da superfície do mar (TSM) semanal em todas as simulações numéricas e parametrizações de cúmulus Betts-Miller (BM) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (KFm).

Para cada evento, os campos compostos para as variáveis atmosféricas simuladas e observadas bem como as anomalias, são obtidos considerando uma média avaliados às 00, 06, 12 e 18 UTC.

Tabela 4.1: Características das integrações para cada experimento utilizando o modelo Regional Eta tempo.

Experimentos	Integração	Inicialização	Downscaling	TSM	Resolução Espacial
1A – KFM ⁽¹⁾ 1B - BM ⁽²⁾	7 dias	12h 12/07/2010	NCAR/NCEP	Semanal	40 km
1A – KFM ⁽¹⁾ 1B - BM ⁽²⁾	6 dias	12h 13/07/2010	NCAR/NCEP	Semanal	40 km
1A – KFM ⁽¹⁾ 1B - BM ⁽²⁾	5 dias	12h 14/07/2010	NCAR/NCEP	Semanal	40 km
1A – KFM ⁽¹⁾ 1B - BM ⁽²⁾	4 dias	12h 15/07/2010	NCAR/NCEP	Semanal	40 km

⁽¹⁾ Kain-Fritsch com fluxo de momento ⁽²⁾ Betts-Miller

4.3. AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO

Sabe-se que as previsões com modelos atmosféricos apresentam incertezas, que podem ser decorrentes da representação inadequada dos processos físicos nos modelos ou mesmo devido a imprecisão dos cálculos e das condições iniciais e de fronteira.

Além disso, observa-se que, em certos eventos, o modelo apresenta grandes erros, posicionando sistemas meteorológicos erroneamente, subestimando ou superestimando a sua intensidade, enquanto que em outros eventos o modelo indica satisfatoriamente sua ocorrência. Assim faz-se necessário uma avaliação do acompanhamento do desempenho dos modelos, bem como o conhecimento dos erros sistemáticos, para que a previsão do tempo e seus produtos sejam interpretados adequadamente.

Para a avaliação das simulações do modelo usaremos os seguintes indicadores baseados em Bustamante et al. (2004). O erro de previsão é a diferença entre os valores previstos e observados. A partir do erro da previsão são calculados os índices de acerto,

subestimativa, superestimativa, Erro Médio (EM), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e Eficiência. Esses índices de desempenho são definidos da seguinte forma:

Acerto – o erro de previsão está num intervalo de valores de erro toleráveis ou críticos pré-determinados;

Subestimativa – o erro da previsão está abaixo do intervalo do erro crítico pré-determinado;

Superestimativa – o erro da previsão está acima do intervalo do erro crítico pré-determinado;

Erro Médio – É a média da diferença entre previsões e observações, indica o erro sistemático.

$$Erromedio = \frac{1}{n} \sum (P_i - O_i) \quad (4.1)$$

Onde P_i e O_i são valores previstos e observados, respectivamente, num ponto i e n é o número de pontos de grade do domínio avaliado (Rozante, 2008).

REQM – É a raiz quadrada do erro médio quadrático entre as previsões e as observações.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (P_i - O_i)^2} \quad (4.2)$$

Também será utilizado a eficiência do modelo em simular a precipitação ocorrida, usando parametrizações convectivas diferentes, através da seguinte expressão:

$$Eficiência = \frac{P_i - O_i}{P_i} \times 100 \quad (4.3)$$

CAPÍTULO 5

5.1. RESULTADOS

5.1.1. Climatologia de Passagens de Frentes Frias na Amazônia

De acordo com dados e metodologia citados anteriormente e usando os critérios pré-estabelecidos tornou-se possível descrever uma estrutura média para as variáveis meteorológicas precipitação, temperatura, ventos e umidade entre outras, para situações de frentes frias sobre a região sul e central da Amazônia.

A região sul da Amazônia é uma área atingida algumas vezes durante o ano por esses sistemas frontais frios. Embora os sistemas afetem o sul do Brasil durante todo o ano, poucos desses chegam e ultrapassam o equador. Contudo, eles ocorrem e essas frentes são mais frequentes no período de maio a setembro (Satyamurty et al., 1998).

Neste capítulo, avaliar-se-á as variáveis meteorológicas precipitação, temperatura, umidade, vorticidade e vento durante as FF que atingiram a região sul da Amazônia entre 2001 e 2010.

5.2. ESTUDO OBSERVACIONAL

Para iniciar o estudo da perturbação atmosférica associada às frentes frias que atingiram a região amazônica construiu-se a tabela 5.1, onde estão identificados, para esses eventos, a precipitação acumulada observada e a temperatura (Média Mínima Mensal e Mínima) nos dias D-1, D e D+1 da evolução do sistema frontal. Os dados são do INMET para Manaus. As linhas em destaque são os eventos que ocorreram no período entre maio e setembro.

A tabela 5.1 mostra que no dia da passagem do evento as chuvas são mais intensas em relação aos dias que o antecedem e sucedem. Em vários eventos houve chuva somente no dia da passagem da FF. A precipitação média no dia da ocorrência do evento, em Manaus, é maior que 40 mm, enquanto que nos dias anteriores e posteriores a chuva é bem menor, da ordem de 4-6 mm. Este resultado mostra a importância das frentes frias para a ocorrência de eventos de chuva forte em Manaus, em particular, e na Amazônia em geral.

Tabela 5.1: Dados diários de Precipitação da estação de Manaus do INMET e Temperatura dos eventos de friagens que atingiram a região no período de 2001 a 2010 para os dias que antecedem (D-1), ocorrem (D) e sucedem (D+1) a FF. As linhas em negrito representam os casos ocorridos durante o verão austral.

Evento	Data	chuva (mm)			Temperatura (°C)			
		D	D-1	D+1	\bar{T}	T	T-1	T+1
1	06/05/01	19.6	0.0	0.8	24.1	23.5	25.6	23.6
2	25/05/02	29.3	4.0	11.2	24.1	23.7	26.1	24.1
3	10/12/02	90.8	1.6	1.2	24.2	23.8	25.9	24.0
4	15/04/03	50.6	30.2	0.0	23.9	23.3	25.3	23.6
5	02/05/03	30.8	14.7	18.4	24.5	23.3	25.6	23.4
6	07/05/03	28.4	1.2	2.8	24.5	24.2	26.5	24.5
7	07/06/03	13.8	0.0	6.6	23.6	22.3	24.7	23.0
8	09/08/04	55.8	0.0	2.9	24.8	22.3	24.5	22.4
9	12/08/04	47.9	0.0	0.0	24.8	24.2	26.8	24.5
10	11/09/04	42.1	6.0	19.4	23.6	23.7	26.0	23.9
11	27/12/04	50.2	0.8	0.0	23.5	23.4	25.5	23.5
12	28/04/05	64.8	43.3	0.4	24.0	23.3	25.5	23.4
13	04/05/06	47.8	32.0	0.0	23.5	23.4	26.0	23.7
14	09/05/06	77.2	0.6	8.3	23.5	23.0	25.1	23.5
15	30/07/06	30.0	0.0	15.4	24.1	23.8	26.2	24.0
16	25/05/07	25.0	0.0	0.0	23.8	23.0	25.3	23.8
17	28/07/07	41.4	0.0	4.0	24.3	24.3	26.6	24.5
18	28/09/07	27.4	0.0	0.0	23.7	22.7	24.8	23.1
19	04/02/08	13.4	S/inf.	S/inf.	24.1	24.0	26.2	24.0
20	02/04/08	10.0	S/inf.	S/inf.	24.3	24.2	26.5	25.0
21	30/04/09	27.4	0.0	S/inf.	24.0	24.0	26.7	24.3
22	01/06/09	28.6	3.2	2.2	23.9	23.2	25.8	23.8
23	17/07/10	13.9	11.6	0.0	23.9	23.5	25.5	23.6
Média		37.7	7.1	4.2	24.0	23,6	25,7	24,6

A identificação desses eventos foi realizada consultando diretamente os boletins Climanalise do CPTEC do período de 2001 a 2010 e as respectivas imagens de satélite no canal infravermelho GOES e aplicando o critério 3.1. A partir dessas informações, utilizou-se os dados de precipitação e temperatura do INMET para Manaus a fim de avaliar o impacto causado, pois essas variáveis apresentam bastante variabilidades durante as friagens ocorridas no verão austral. Analisando-se todos os 23 casos, pode-se perceber na tabela 5.1 que a chuva variou com valores abaixo de 25 mm nos casos 1, 7, 16, 19, 20 e 23 e acima de 90 mm no caso 3, obtendo assim um valor médio de 37,7 mm/dia de chuva na ocorrência do evento para a cidade de Manaus. Esse valor é muito maior que a média diária de 6,3 mm/dia se considerar o ano todo (e a média da estação chuvosa de novembro a março é de 7,84 mm/dia). Portanto, pode-se dizer que a passagem de frente fria produz precipitação muito mais intensa que a média. Até o episódio mais fraco, que foi o mais recente do nosso estudo, registrou 13,8 mm/dia de chuva que ainda assim está bem maior que a média.

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes no estudo de tempo. A chuva sofre efeito na sua intensidade e distribuição durante a passagem e evolução de frentes frias. Comparando-se a precipitação climatológica com a precipitação ocorrida durante os eventos de passagens de frentes frias que atingem a região Amazônica, pode-se identificar regiões de anomalias positivas significantes. Observam-se que os valores de precipitação chegam até dobrar e, dessa forma, podemos notar o impacto causado na chuva.

Na figura 5.1 estão representados os valores observados de chuva e temperatura, em Manaus. É possível perceber altos valores de precipitação, como por exemplo nos episódios 3 e 14 onde tivemos valores acima de 75 mm. Todavia, na maioria dos casos a chuva varia entre 15 e 50 mm. Percebe-se ainda que durante todos os eventos, a temperatura no dia D em Manaus, é menor que a média mensal da temperatura mínima.

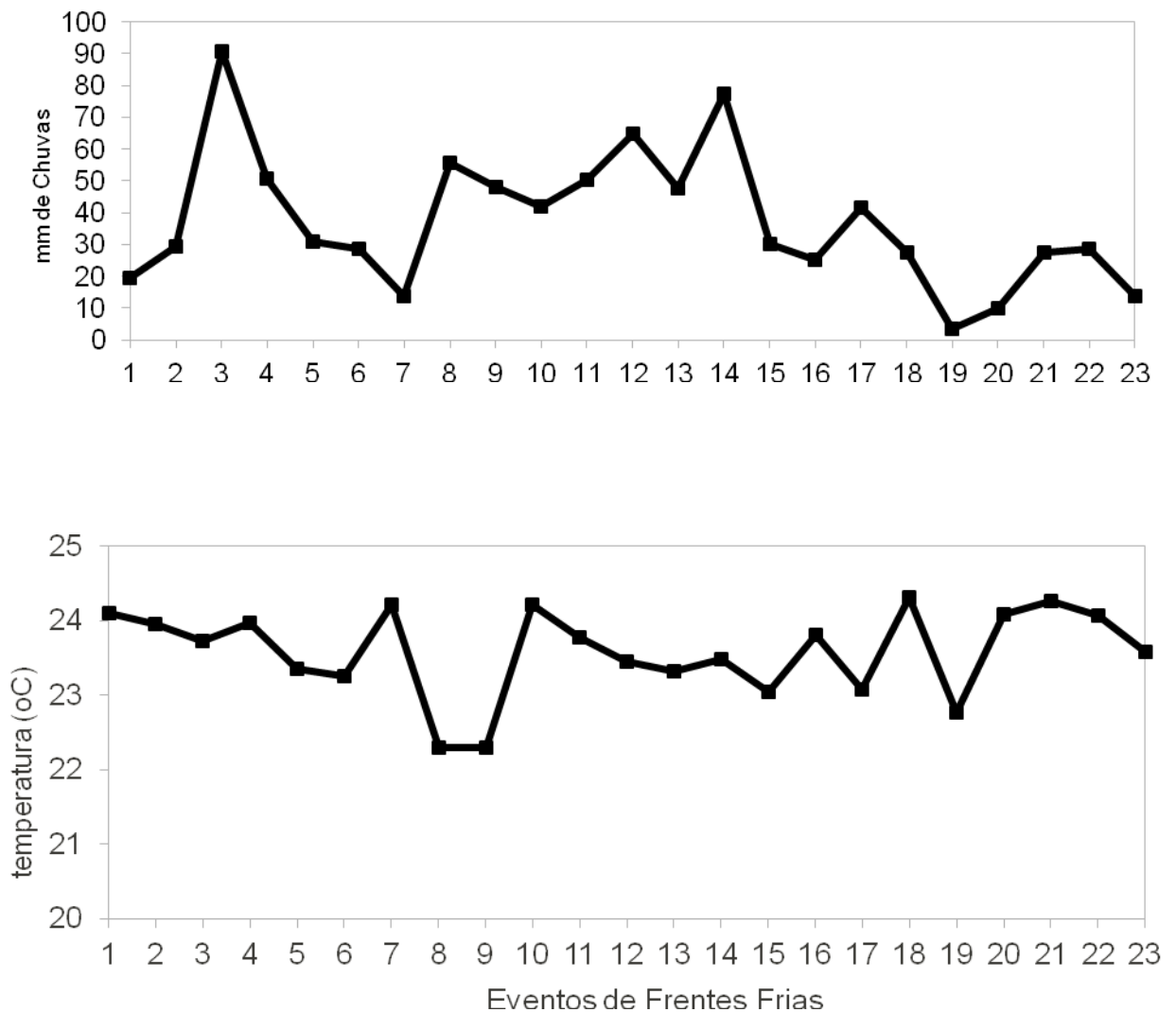


Figura 5.1: Precipitação e temperatura observada em Manaus no dia D durante os 23 eventos de frentes frias na Amazônia no período 2001-2010. A Correlação obtida foi de 17,7%.

Observa-se eventos com alta precipitação enquanto que a temperatura sofre pouca variação. Uma observação muito importante é a falta de uma relação entre a temperatura e a precipitação. Isso fica evidente quando se calcula a correlação entre essas variáveis e encontra-se o valor de 17,7%, ou seja, a precipitação e a temperatura durante episódios de frentes frias apresentam uma baixa correlação. Dessa forma o estudo dessas variáveis devem ser realizados separadamente. A temperatura do ar frio na retaguarda da frente fria pode ser

baixa ou alta (entre 22°C e 24°C) e a mesma não é uma indicadora da precipitação que acompanha a frente.

5.2.1 Composto dos Eventos de Frentes Frias na Região Amazônica durante o Verão Austral

Durante o verão austral encontrou-se 16 casos de frentes frias, e nesses, a quantidade média de chuva ocorrida, em Manaus, foi de 34,96 mm, um valor muito acima da média climatológica (30 anos) para o mesmo período. Observa-se ainda que a média dos dias que antecedem e sucedem os eventos são, respectivamente, 7,1 mm e 4,2 mm (Tab. 5.1). Isto é, os eventos de FF no verão austral causam chuvas significativas quando comparadas aos dias onde não há a atuação das mesmas.

A partir dos dados do NCEP/NCAR realizou-se um estudo observacional dos campos da precipitação, da temperatura, umidade, vorticidade e dos ventos visando definir um padrão para essas variáveis meteorológicas e também calcular a anomalia dessas variáveis durante os eventos de frentes frias que atingiram a região sul e central da Amazônia. A evolução dessas variáveis são apresentadas nas figuras seguintes para o dia da chegada do evento (D), o dia anterior (D-1) e o dia posterior (D+1) a ocorrência do evento.

A figura 5.2 mostra a precipitação média para os dias em que ocorreram os eventos de friagens durante o verão austral para todo o Brasil. O objetivo dessa análise é identificar a distribuição espacial e temporal da chuva causada pela passagem da frente fria e comparar com a climatologia do mesmo período.

Observa-se, focando principalmente a área de estudo, que a climatologia (acima) para este período está abaixo de 8 mm/dia sobre a maior parte da região. Durante a passagem da frente (compostos, no meio) as chuvas aumentam para até 16 mm/dia principalmente ao norte de 8°S. Isto é, a chuva associada a frentes frias atinge o dobro do valor da média, mostrando

assim, uma grande influência dos sistemas frontais na precipitação da região. Nota-se que as anomalias (em baixo) da chuva são todas positivas em toda a região de estudo.

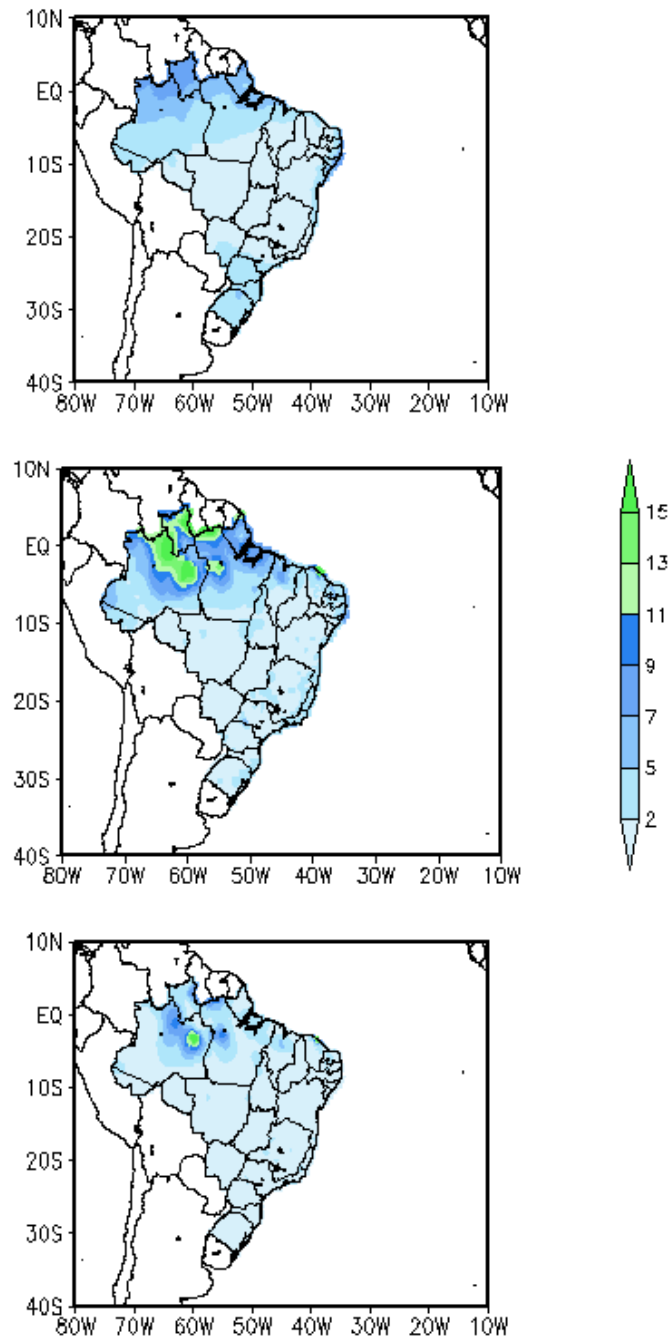


Figura 5.2: Climatologia (no topo), compostos (no meio) e anomalia (em baixo) da precipitação, em mm/dia, durante o verão austral, para o dia D da passagem do evento de FF em Manaus.

A figura 5.3 mostra a evolução da temperatura. Observa-se uma queda de temperatura nesse período, em relação a climatologia, que é consequência da penetração da massa de ar frio. A temperatura climatológica em grande parte do Sul da Amazônia é maior que 24°C e essa temperatura sofre uma variação durante a passagem da frente, apresentando anomalias negativas em torno de $3,5^{\circ}\text{C}$ na região ao sul de 8°S , 2°C na região central e $0,5^{\circ}\text{C}$ no norte do Amazonas.

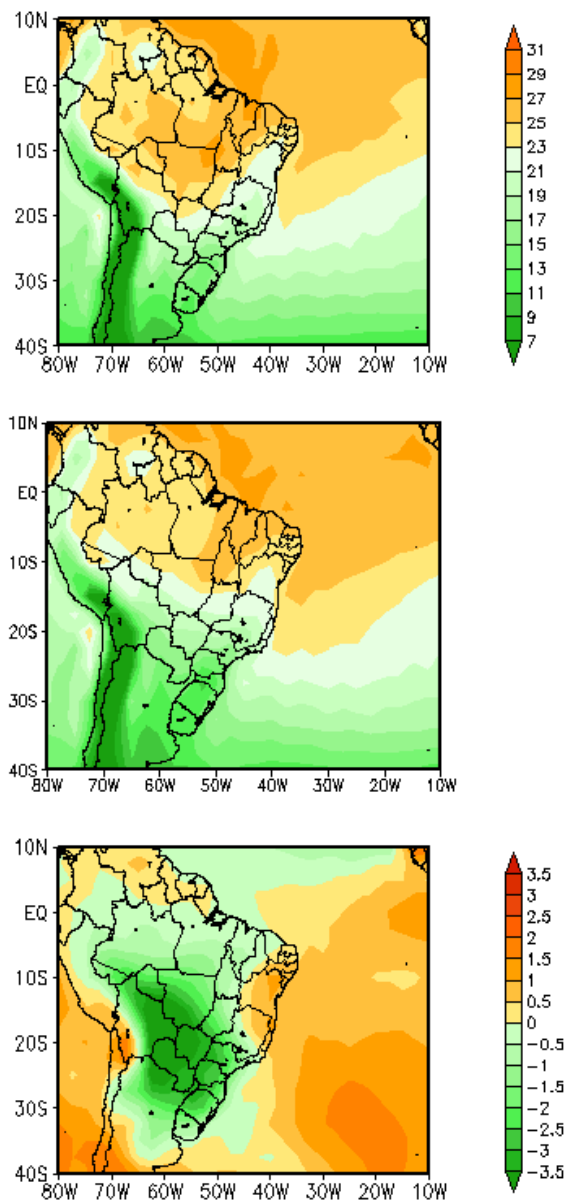


Figura 5.3: Climatologia (topo), Compostos (meio) e Anomalia (em baixo) de temperatura em $^{\circ}\text{C}$ dos eventos de friagens ocorrido no verão austral.

Essa variação é causada pelo fenômeno conhecido por friagem na região Amazônica. É interessante notar que as anomalias negativas de temperatura são orientadas de noroeste para sudeste, perpendicular ao avanço da frente fria.

A figura 5.3 também mostra o avanço da massa de ar frio sobre o Chile, Argentina, Bolívia e sobre o sul e o sudeste do Brasil. Verifica-se que a anomalia da temperatura é negativa e superior a 3°C sobre a Argentina, Paraguai, Sul do Brasil e Sul da Região Centro Oeste do Brasil.

Na Região Amazônica nota-se que, em média, a passagem de uma frente fria causa um esfriamento de 1°C a 3°C, principalmente no Sul da Amazônia. Esse resultado mostra que a variação da Temperatura durante os episódios de frentes frias é bem menor sobre a Amazônia do que nos extratropicais.

As figura 5.4 e 5.5 mostram a evolução da precipitação e da temperatura do dia D-1 ao dia D+1.

Observa-se, na figura 5.4, como a precipitação evolui durante o evento. No dia D-1 a precipitação começa a se formar, no formato de núcleos isolados, ocasionando chuva em toda a região sem muita intensidade. No dia D do evento a chuva intensifica e um dia após (D+1) a mesma diminui deslocando-se para a região norte e nordeste da Amazônia indicando a dissipação da convecção.

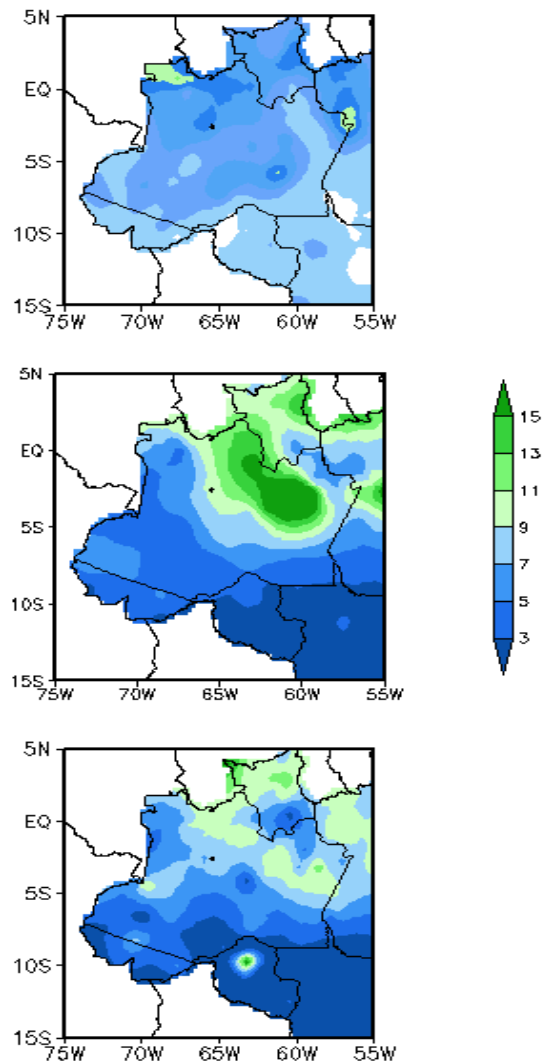


Figura 5.4 : Compostos da precipitação em mm/dia nos dias D-1, D e D+1, respectivamente, durante os eventos de Frentes Frias.

De forma análoga, a figura 5.5 mostra a evolução da temperatura no mesmo período. A temperatura, juntamente com a precipitação, é a principal variável meteorológica que indica a ocorrência de uma frente fria, pois a mesma sofre uma variação num intervalo de tempo muito curto, da ordem de algumas horas.

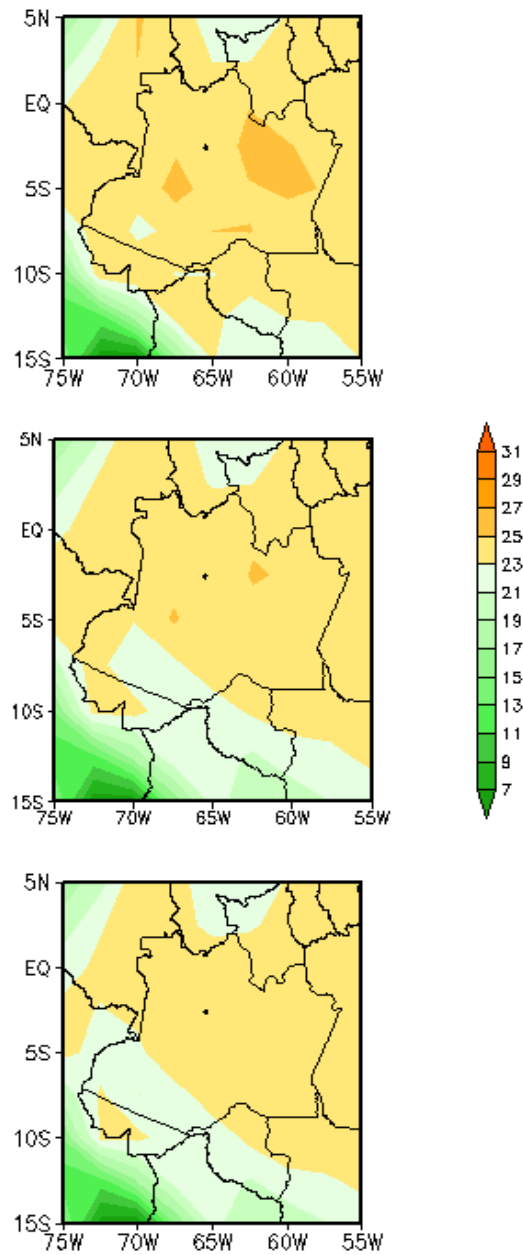


Figura 5.5: Como na fig. 5.4 exceto para a temperatura, em °C.

No dia D-1, a temperatura começa a apresentar uma queda. No dia D da ocorrência do evento verifica-se uma maior queda de temperatura principalmente no sul e adentrando a região. No dia D+1 a temperatura volta a aumentar representando a dissipação da FF.

Com relação aos campos de ventos, a figura 5.6 mostra o padrão dos mesmos em 850 hPa juntamente com a convergência (em azul) e a divergência (em vermelho) de umidade.

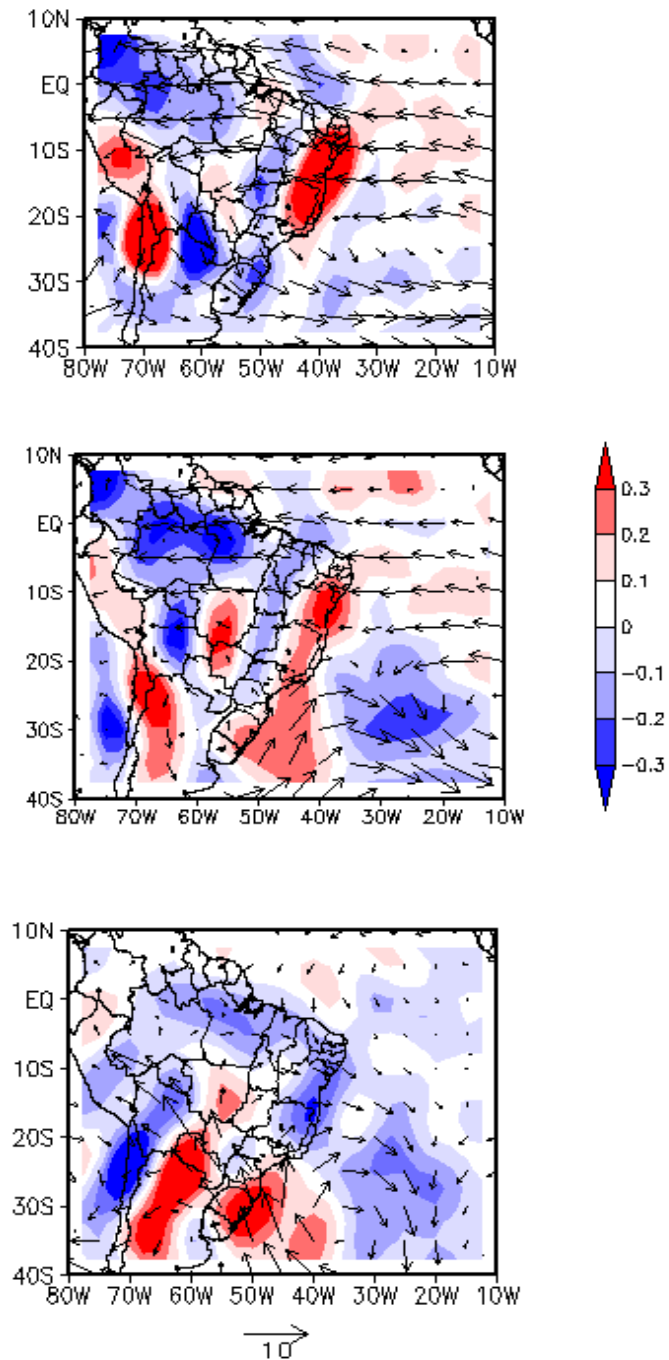


Figura 5.6: Climatologia (em cima), composto dos eventos de frentes frias (no meio) e anomalia (em baixo) dos campos de ventos em 850 hPa para o verão austral. O vermelho representa divergência e o azul convergência de umidade.

Durante os eventos de frentes frias tem-se uma mudança no padrão dos ventos. Percebe-se uma mudança na componente meridional. Ventos de sul predominam na retaguarda da frente e dessa forma tem-se ventos mais frios. Essa mudança no sentido e na intensidade do vento são características durante os eventos de frente frias que serve como validação dos critérios que também são usados para identificação desses sistemas frontais. Observa-se ainda que na climatologia predominam os ventos de leste que sofrem desvios próximos dos Andes e seguem para sul e sudeste do país e durante uma frente fria os ventos são de sul conforme se verifica no campo de anomalia da figura 5.6.

Ainda com relação a figura observa-se, em relação a climatologia, uma forte divergência sobre o nordeste e sobre os Andes e uma grande convergência de umidade sobre a Amazônia que vai influenciar o clima na região sul e sudeste. Durante a passagem de uma frente fria obtém-se uma convergência sobre a Amazônia, mas precisamente sobre o Amazonas e sul da região, indicando ocorrência de chuva sobre essa área. A climatologia mostra grande parte da região central e sul da bacia com bastante convergência de umidade, típico da ocorrência de precipitação.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram os compostos (coluna à esquerda) e a anomalia (coluna à direita) da evolução dos campos de ventos em 200 hPa e 925 hPa, respectivamente.

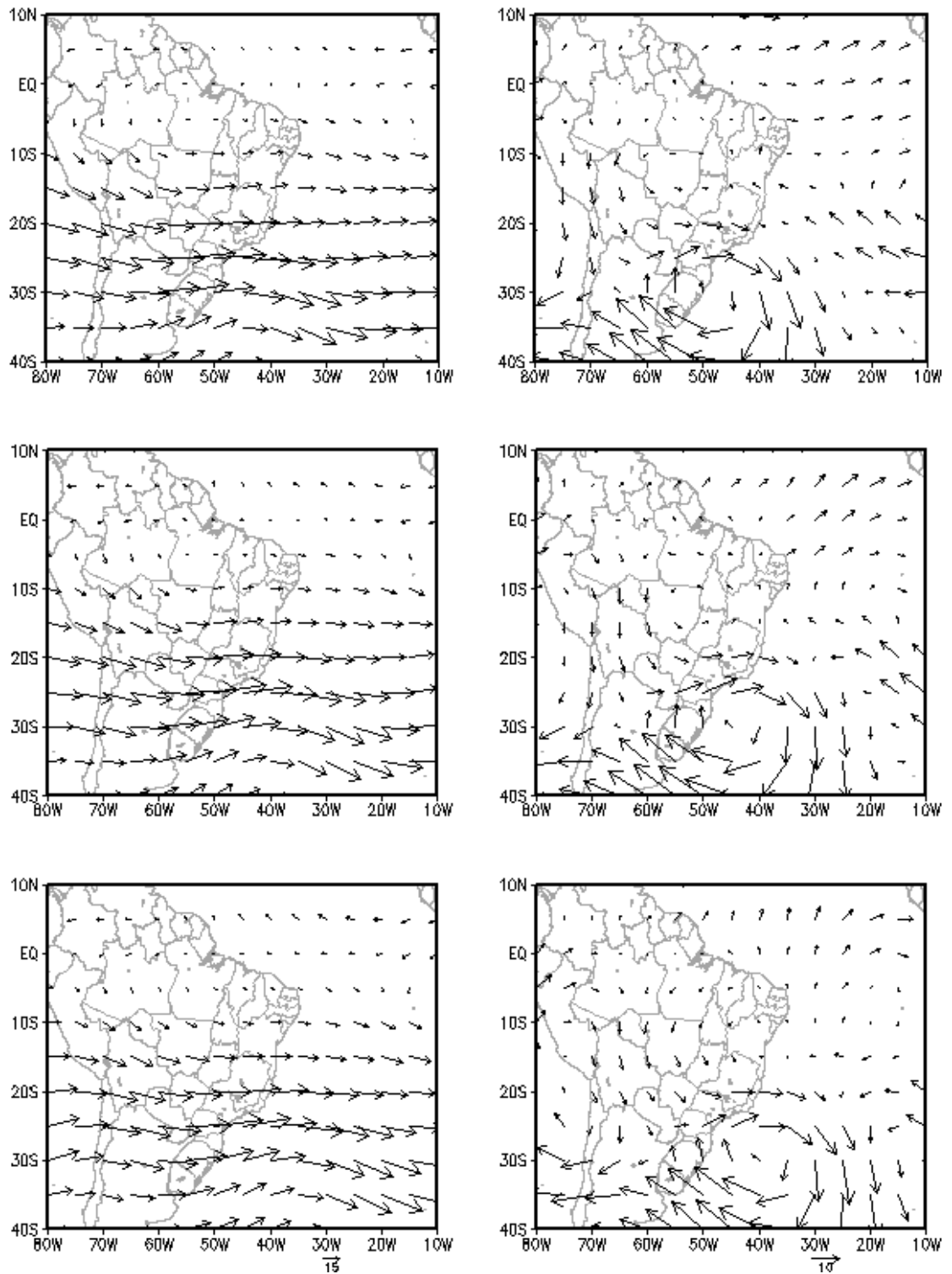


Figura 5.7: Compostos (à esquerda) e anomalia (à direita) de ventos em 200 hPa para os dias D-1(topo), D (meio) e D+1 (em baixo) da ocorrência do evento de frente fria.

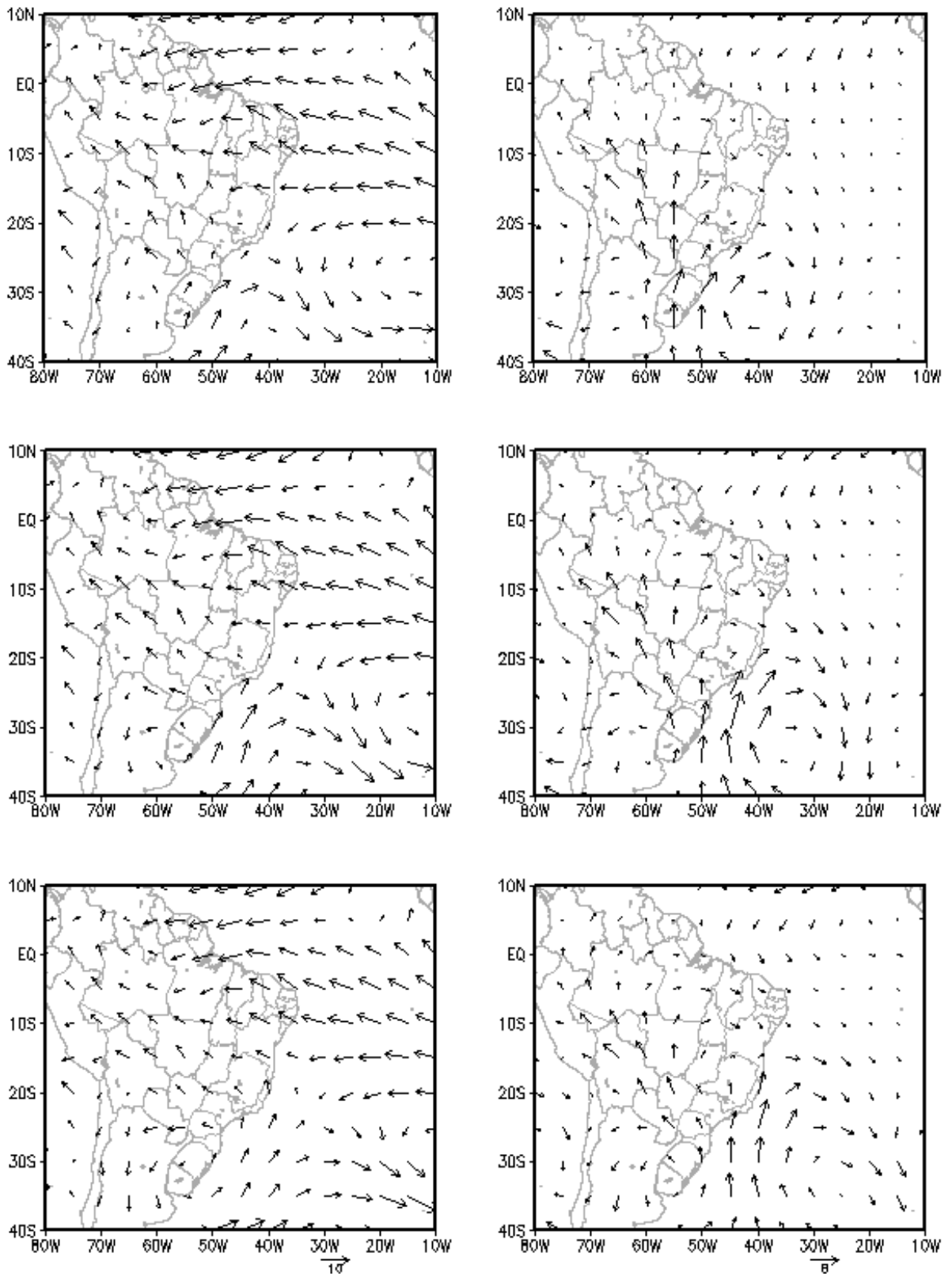


Figura 5.8: Compostos (à esquerda) e anomalia (à direita) de ventos em 925 hPa para os dias D-1(topo), D(meio) e D+1 (em baixo) da ocorrência do evento de frente fria.

Os ventos, em altos níveis, são fracos nas latitudes equatoriais e ao norte de 5°S. Ao sul de 15°S os ventos são basicamente de oeste. Superpostas sobre os ventos básicos existem ondulações (perturbações) que podem ser vistas nas anomalias. Pode-se perceber uma forte circulação ciclônica sobre o sul do Brasil e regiões adjacentes. Ciclone em altos níveis indica a troposfera relativamente fria ao sul de 20°S. As anomalias de vento são, basicamente, de norte e leste ao longo da Cordilheira dos Andes entre 8°S e 25°S e a oeste de 60°W.

A Figura 5.8 mostra os compostos e as anomalias dos ventos em 925 hPa para os dias D-1, D e D+1. Um anticiclone sobre Argentina e um cavado deslocam-se para leste desde D-1 a D+1 a uma velocidade de aproximadamente 7° longitude por dia (Vale ressaltar que uma frente é um cavado mas o contrário não é verdade). A região de alta pressão compreendida entre oeste de 36°W e sul de 25°S no Atlântico sul está associada à FF. A noroeste da região de baixa pressão os ventos de sul advectam ar frio em direção ao norte para a Bacia Amazônica fazendo a temperatura cair. As anomalias de vento mostram um ciclone com centro em 33°S e 33°W e fortes ventos de sudeste a noroeste, com uma longa faixa até o sul da Bacia Amazônica.

Comparando-se as figuras 5.7 e 5.8 pode-se observar, desde D-1 até D+1, uma inclinação para oeste do centro ciclônico de cerca de 12° de longitude entre os níveis 925 hPa até 200 hPa indicando a existência de massa de ar frio do lado oeste do cavado em baixos níveis. A circulação ciclônica anômala na baixa troposfera e um anticiclone anômalo na alta troposfera entre 7°S e 20°S e 60°W e 45°W indicam as características de ar quente na média troposfera.

Verificam-se diferenças no fluxo durante ocorrência de frentes frias quando comparadas com os padrões apresentados em condições normais. Nota-se na figura 5.9 uma divergência sobre o oceano Atlântico enquanto se encontra uma intensa convergência de

umidade sobre a floresta amazônica. Os ventos alísios transportam umidade da região oceânica para a região amazônica. Normalmente (climatologia), uma boa parte da umidade é transportada para sul a leste dos Andes.

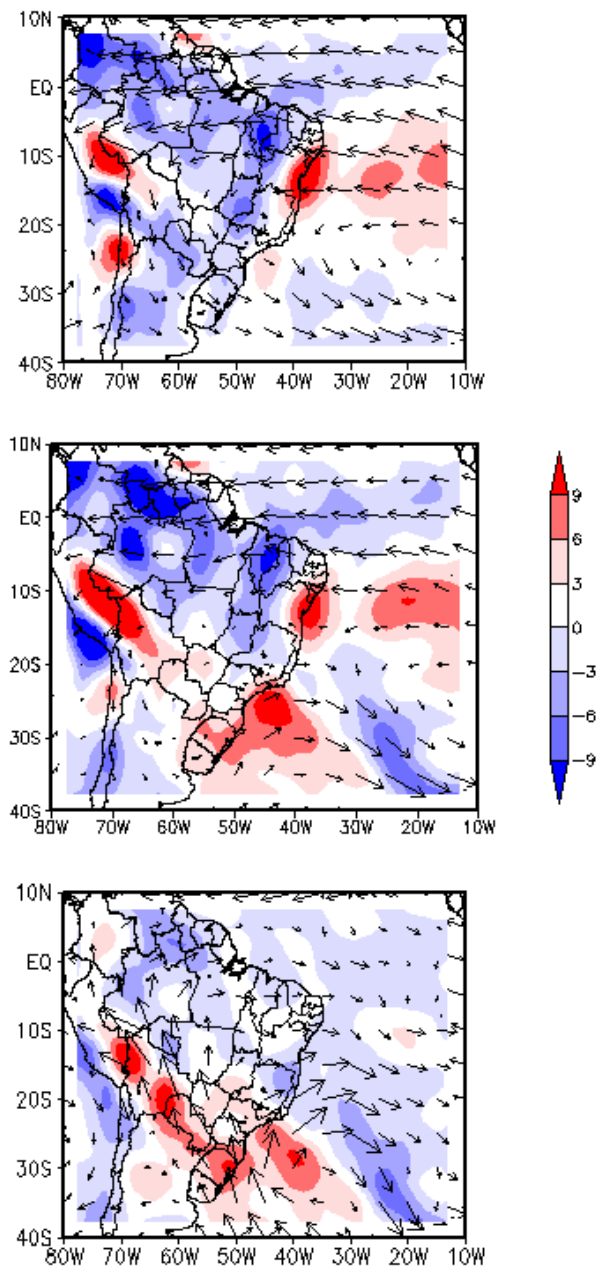


Figura 5.9: Climatologia (topo), Composto dos eventos de frente fria na Amazônia (meio) e anomalia (em baixo) do fluxo de umidade integrado na vertical (vetores), convergência de umidade (sombreada), nos eventos de Frentes Frias na Bacia Amazônica. Unidades do fluxo: $10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Unidades de convergência do fluxo: 10^{-5} m s^{-1} .

Os compostos da convergência de umidade integrada verticalmente e suas anomalias para o dia D da ocorrência do evento são mostrados na figura 5.9, juntamente com a climatologia, que apresenta ventos de norte a leste dos Andes e ao sul de 12°S.

Os compostos mostram fluxos de umidade de sudoeste, isto é, quando a frente fria atinge a Bacia Amazônica, os ventos na massa de ar frio têm uma forte componente para norte e giram de forma ciclônica nas proximidades da frente. Na situação de Frente Fria o transporte de umidade para sul enfraquece e dessa forma, a convergência sobre a Amazônia aumenta. Essa maior convergência de umidade sobre a Amazônia durante os episódios de friagens contribui para o aumento da precipitação.

Comparando-se as figuras 5.6 e 5.9 pode-se concluir que os padrões dos fluxos de vapor de água integrado na vertical são semelhantes aos dos ventos na baixa troposfera. Isto é, os ventos da baixa troposfera, dominam nos fluxos de umidade.

Na climatologia há um forte fluxo do sul da Bacia Amazônica para sul e sudeste do Brasil. Nos compostos de frentes frias este fluxo está ausente ou é muito fraco. Como o fluxo de umidade em direção ao sul está relacionada com o jato de baixo nível (JBN), podemos deduzir que o JBN está ausente ou fraco sobre a Bolívia e regiões adjacentes quando a frente se encontra sobre a Bacia Amazônica.

Na Figura 5.10 apresentam-se as anomalias de vorticidade na alta e baixa troposfera. A vorticidade ciclônica em 850 hPa associada com a frente fria se estende desde o Oceano Atlântico Sul em direção ao noroeste da Bacia Amazônica. Na alta troposfera a banda da anomalia anticiclônica está situada sobre a anomalia ciclônica em baixo nível, o que mostra a presença de ar quente na média troposfera na região ao norte de 20°S sobre o continente sul americano. Isto é, embora o ar frio penetre na bacia Amazônica próximo a superfície, a média troposfera é aquecida o que torna uma camada muito estável. Esta situação é propícia para

turbulência de céu claro. Na dianteira da zona ciclônica em 850 hPa, no setor de ar quente, a atividade convectiva é forte, como foi visto nas imagens de satélite nas figuras 2.5 e 2.6.

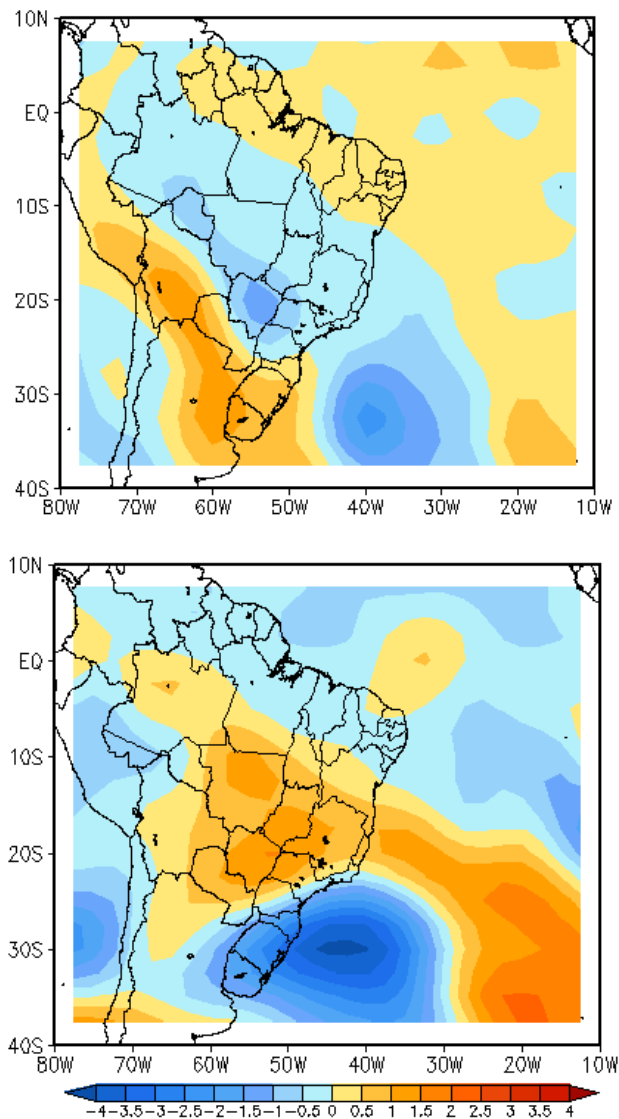


Figura 5.10: Anomalia em 850 hPa (em cima) e em 200 hPa (em baixo) da vorticidade relativa no dia D do evento de frente fria na Amazônia. A vorticidade ciclônica está representada em tons de azul e a vorticidade Anti-ciclônica em tons de amarelo. Unidades: 10^{-5} s^{-1} .

5.3. IMPACTO DAS FRENTES FRIAS EM MANAUS

Com o objetivo de uma melhor análise e entendimento do comportamento da precipitação, temperatura (máxima e mínima), altura geopotencial e ventos durante a evolução e passagem de uma frente fria, destacou-se dois casos de friagens que ocorreram durante o período compreendido entre 2001 a 2010.

A variabilidade dessas variáveis meteorológicas durante a ocorrência desses eventos (casos 23 e 16 da Tabela 5.1) está apresentada nas figuras a seguir. Vale ressaltar que para os gráficos comparativos (Precipitação, Tmax e Tmin) foram utilizados dados do INMET enquanto para as demais figuras (Geopotencial, Temperatura e Ventos) usou-se dados do NCEP.

No caso 23, a chuva em Manaus é menos intensa que no caso 16. Nos gráficos apresentam-se as seqüências dessas variáveis meteorológicas para São Paulo, Brasília e Manaus. Através dos mesmos identifica-se a fase da evolução e passagem da frente fria nessas três localidades pois, sabe-se que as mudanças nas condições do tempo são sentidas no sul e no sudeste antes de atingir a região amazônica.

Esses eventos de frentes frias foram escolhidos devido apresentarem um grande impacto na precipitação e/ou temperatura na região estudada e também no período em que elas ocorreram (verão austral). Para tanto foram incluídos os dias que antecederam e sucederam a passagem da frente, buscando observar a estrutura da atmosfera durante sua evolução. Essas características podem ajudar na melhora da previsão da passagem de frente fria na Amazônia. As figuras 5.11 a 5.14 apresentam as variações de precipitação e temperatura em Manaus e os campos de altura geopotencial, temperatura e ventos, em 925 hPa, respectivamente, para o evento 23 da tabela 5.1.

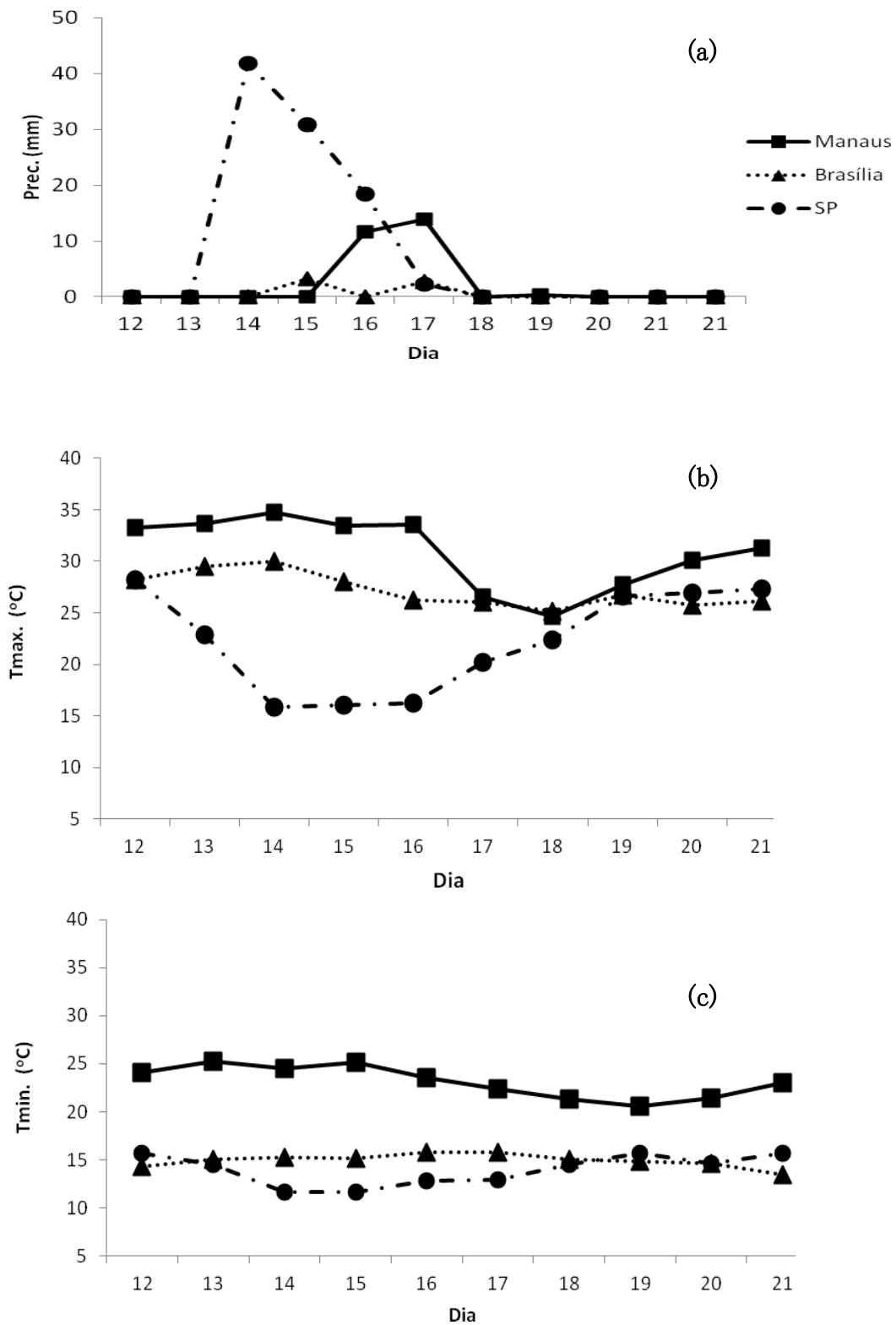


Figura 5.11: Sequência de (a) dias de precipitação (mm/dia), (b) Temperatura Máxima e (c) Temperatura Mínima em São Paulo, Brasília e Manaus para passagem de Frente Fria. Evento 24 da Tabela 5.1: 12-21 de julho de 2010.

Na figura 5.11(a) observa-se um pico de precipitação primeiramente em SP no dia 14/07, de 42 mm e outros dois nos dias 15 e 16 com aproximadamente 30 mm e 18 mm de chuva, respectivamente. Quantidades menores de chuvas foram registrados em Manaus nos dias 16 e 17 de julho, dia da passagem frontal. Em Brasília observa-se pouquíssima precipitação ocorrida no período.

No dia 15, em São Paulo, pode-se observar uma queda acentuada na temperatura máxima, conforme pode-se observar na fig. 5.11(b), entre os dias 12 a 14 de cerca de 13°C. Em Brasília, a temperatura máxima caiu de 4°C entre os dias 14 a 16. Em Manaus a temperatura máxima caiu de forma mais acentuada do que em Brasília, cerca de 8°C entre os dias 16 a 17 e cerca de 2°C, entre 17 a 18. Claramente, existe uma defasagem de 3 dias entre a passagem do sistema frontal frio em São Paulo e Manaus. Além disso, a massa de ar frio deslocou-se para o norte próximo a Cordilheira dos Andes. Essa é a razão para uma queda menor de temperatura em Brasília, onde a chuva pré-frontal foi mais intensa do que no dia da passagem da frente. A temperatura mínima em São Paulo caiu 5 °C, de 12 a 14, enquanto que não houve mudança em Brasília como pode ser observado na fig. 5.11(c). No entanto, a temperatura mínima, em Manaus, caiu gradualmente entre os dias 15 a 19 cerca de 5 °C. Este evento ocorreu no meio do inverno e, portanto, as declinações de temperatura eram muito proeminentes em São Paulo.

Verifica-se ainda que essa frente atingiu a cidade de Manaus de forma mais intensa, durante os dias 16 e 17, já no dia 18 observa-se a sua dissipação sobre o oceano. Vale ressaltar que esse evento de frente fria que atingiu a Amazônia não causou grande impacto na precipitação mas apresentou uma queda na temperatura bastante significativa.

As figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram a geopotencial, a temperatura e os campos de ventos em 925 hPa, respectivamente, e as suas anomalias com respeito à climatologia, para o

caso de inverno austral de 17 de Julho de 2010 (evento 23 da Tabela 5.1).

No dia 16 de Julho (D-1) o campo geopotencial (Fig. 5.12) apresenta uma célula de alta pressão situada sobre a Argentina, Uruguai e regiões adjacentes e um centro de baixa pressão associado a frente fria está situado a sul de 40°S no Atlântico, entre 30°W e 20°W.

Observa-se um cavado invertido nos flancos ao norte da célula de alta pressão. Esta é uma característica das situações de frentes frias atingindo a Bacia Amazônica (Satyamurty et al., 2000). O movimento de alta e baixa extratropical para leste em 17 (D) e 18 de Julho (D+1) mostra uma velocidade de cerca de 7° de longitude por dia. O cavado invertido sobre o continente não se propaga, mas se aprofunda no dia D e enfraquece após, em D-1. É interessante notar que a isolinha de anomalia positiva de 30 m propaga para o norte sobre a região Amazônica.

Os campos de temperatura em 925 hPa (Fig. 5.13) mostram anomalias negativas avançando para norte de 10°S desde D-1 a D+1 nas regiões centrais ocidentais do continente. Os campos de anomalias também mostram uma clara fronteira entre o ar quente e o ar frio orientada no sentido SE-NW indicando a posição do sistema frontal na Amazônia, no dia D. Pode-se verificar uma diferença de mais de 20°C entre a parte leste do Pará e a parte oeste do Amazonas nos dias D e D+1.

Fortes ventos de sul (Fig. 5.14) chegam a norte de 10°S sobre a parte ocidental da Bacia Amazônia no dia 16 (D-1), indicando forte advecção de ar frio. As anomalias de vento mostram fortes ventos e um movimento ciclônico em torno do cavado invertido. A oeste do cavado invertido sobre o continente observa-se o avanço de ventos de sul para a Amazônia Ocidental, características de frentes frias.

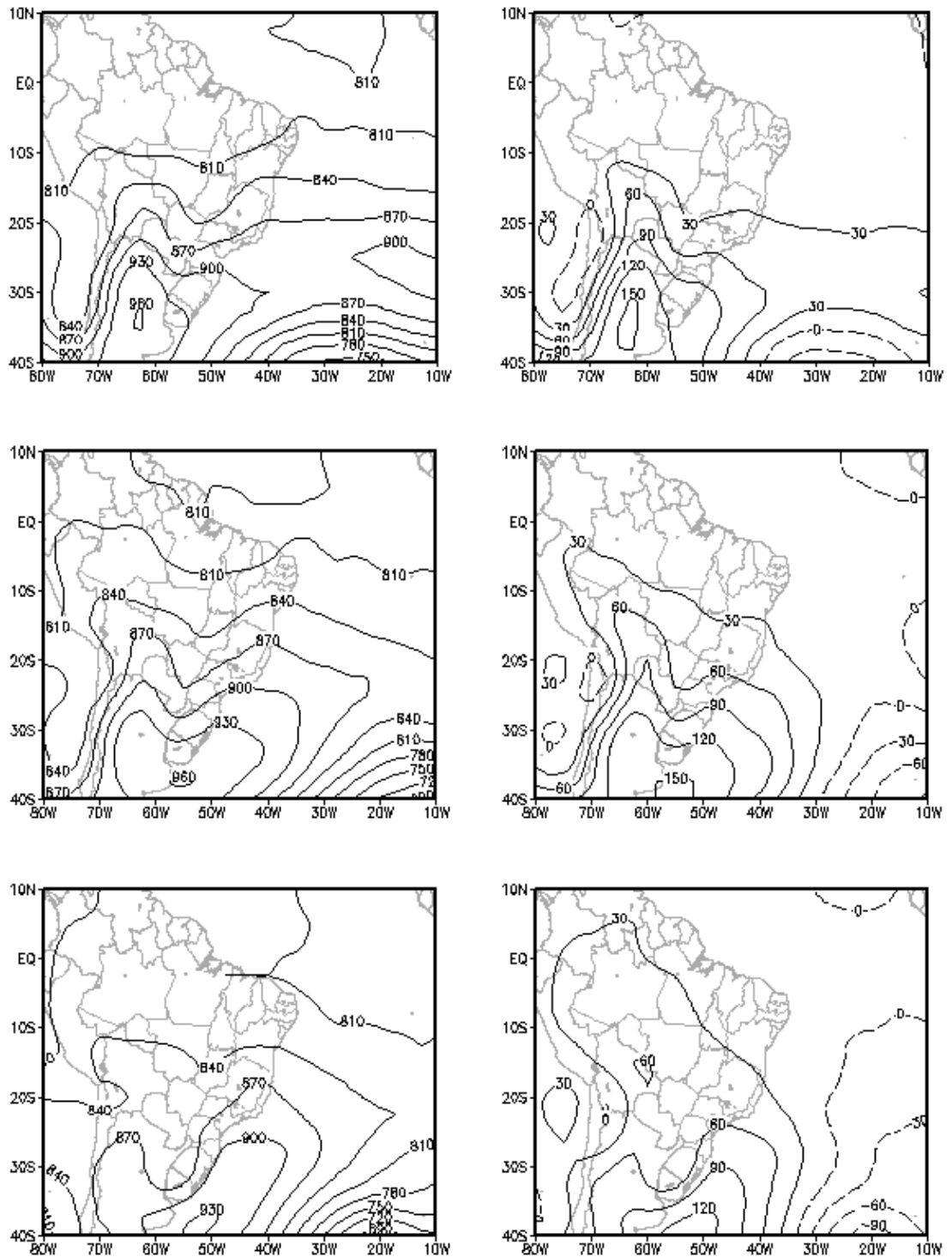


Figura 5.12 : Altura Geopotencial para D-1 (topo), D(meio) e D+1 (em baixo). Evento 23 da tabela 5.1: 16-18 de julho de 2010. As colunas da esquerda e direita mostram os compostos e as anomalias, respectivamente, em 925 hPa. Unidades: m.

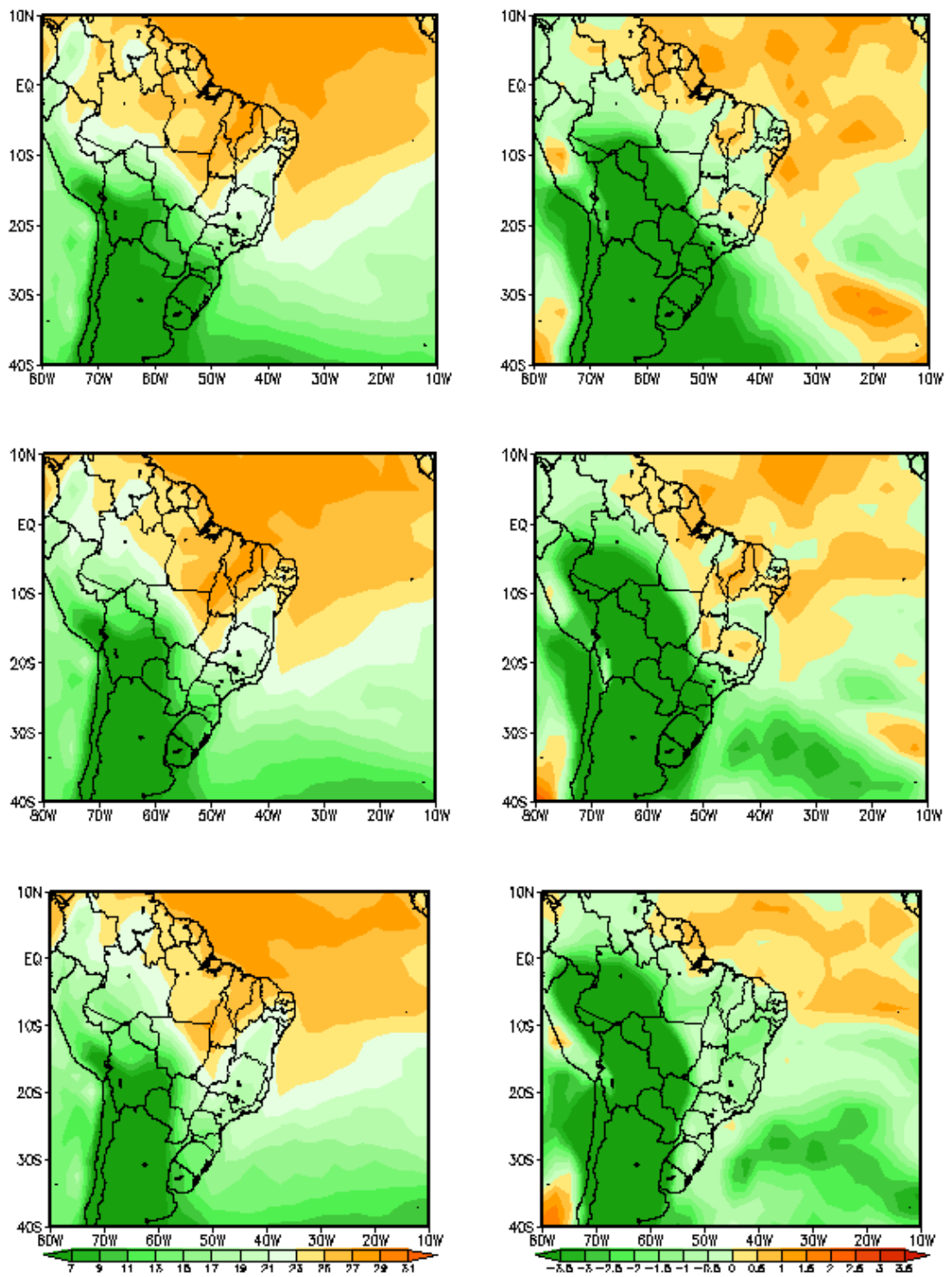


Figura 5.13: Como na figura 5.12, exceto para a temperatura, em 925 hPa. Unidade: °C.

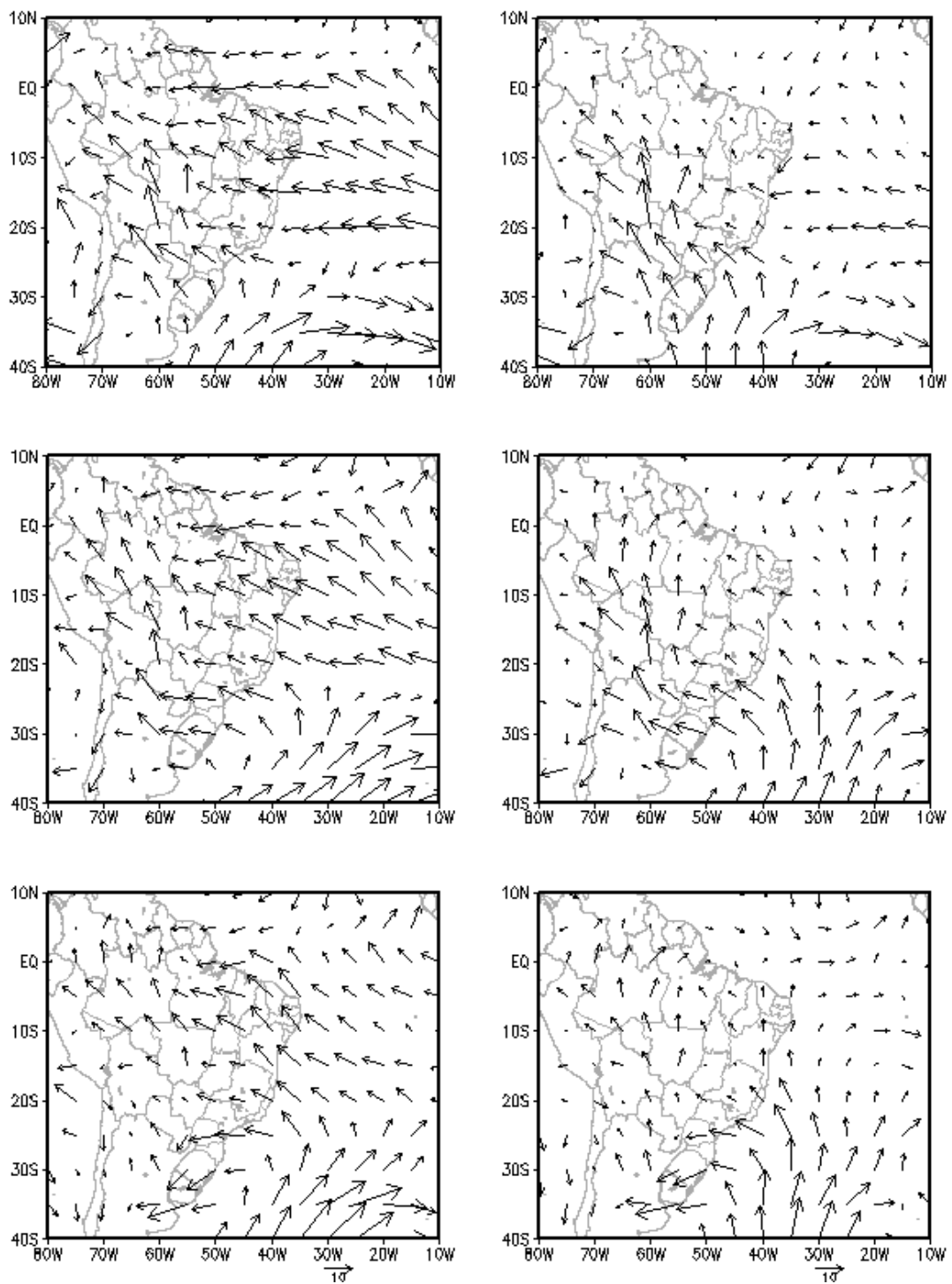


Figura 5.14: Como na figura 5.12, exceto para os campos de ventos em 925 hPa.

Unidades: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

No evento 16 da tabela 5.1, ocorrido no período de 21 a 31 de maio de 2007, observou-se que durante o período de 11 dias, Manaus apresentou três episódios de chuvas conforme se pode observar na figura 5.15, nos dias 25, 28 e 30 de maio de 2007. Todavia, apenas o primeiro episódio está associado a passagem de frente fria.

Observa-se na figura 5.15 que a precipitação no dia 23 em São Paulo foi próxima de 20 mm. Chuva de menos de 10 mm ocorreu no dia 24 em Brasília. Uma chuva intensa de 25 mm ocorreu no dia 25 em Manaus, dia da passagem do evento. A precipitação de mais de 20 mm no dia 28 em Manaus não está relacionado a incursão de ar frio do sul.

A temperatura máxima caiu de 10 °C entre os dias 21 e 23, em São Paulo, e cerca de 7°C em Brasília nos dias 23 e 24. Em Manaus observa-se uma queda de 7°C entre os dias 24 a 26. Neste caso, encontramos uma defasagem de dois dias entre a passagem da frente fria em São Paulo e em Manaus. No entanto, no dia 30, houve uma passagem de um segundo sistema frontal frio em São Paulo, com uma queda de 10°C na temperatura máxima dia 28. Houve uma queda de temperatura um dia depois (de 29 a 30) em Manaus. As temperaturas máximas em São Paulo e Brasília mostraram quedas de mais de 5°C. No entanto, a temperatura mínima em Manaus apresenta uma ondulação pequena. É interessante notar que a chuva em Manaus foi maior do que em São Paulo e também observa-se dois picos de chuva forte em Manaus após a passagem do evento, diferentemente do caso anterior, conforme mostra as figuras 5.11 e 5.15, onde em São Paulo é que ocorre esses picos.

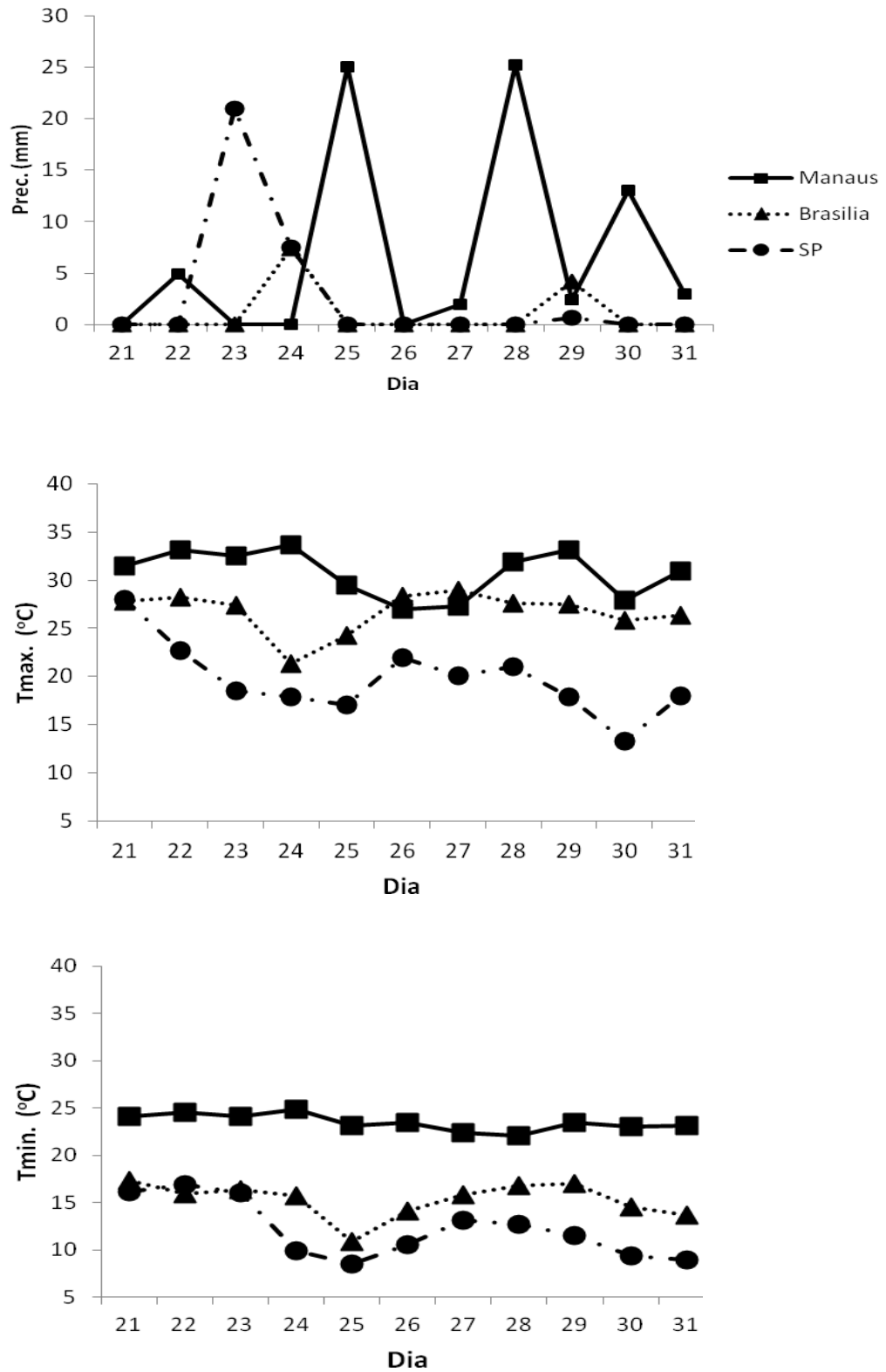


Figura 5.15: Como na figura 5.11, exceto para o evento 17 da Tabela 5.1: 21-31 de maio de 2007.

As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam, respectivamente, os campos de altura geopotencial, temperatura e ventos em 925 hPa.

Na figura 5.16 observa-se em D-1 um centro de alta pressão sobre a Argentina, entre 25 °S e 65 °W e um centro de baixa pressão situado ao sul de 25°S, que se deslocam em D e D+1. semelhante ao do evento de 2010, tendo em vista que ambos ocorreram no verão austral. Isso é característica da passagem de um sistema sinótico extratropical. Todavia, a anomalia da pressão (em geopotencial) é insignificante nos dias D e D+1. Esse exemplo fortalece a idéia de que a perturbação da pressão não pode ser usada para identificação de frentes frias na Amazônia.

Na figura 5.17 temos o campo de temperatura, onde se observa a chegada da massa de ar frio em 10°S no dia D-1 atingindo 5°S nos dias D e D+1, ocasionando a presença de anomalias negativas de temperatura de até 3,5°C causando frio na região. Novamente a zona frontal apresenta uma orientação de oeste da Amazônia para o norte da região sudeste

Apresenta-se, na figura 5.18, o comportamento dos campos de ventos em 925 hPa, destacando-se a presença de fortes jatos de baixos níveis de sul ao norte de 10°S atingindo a região amazônica nos dias D-1 e D, indicando advecção de ar frio. Esses fortes ventos de sul são características típicas de sistemas frontais frios. A partir do dia D+1 percebe-se que esses ventos vão enfraquecendo indicando assim, o enfraquecimento do sistema frontal.

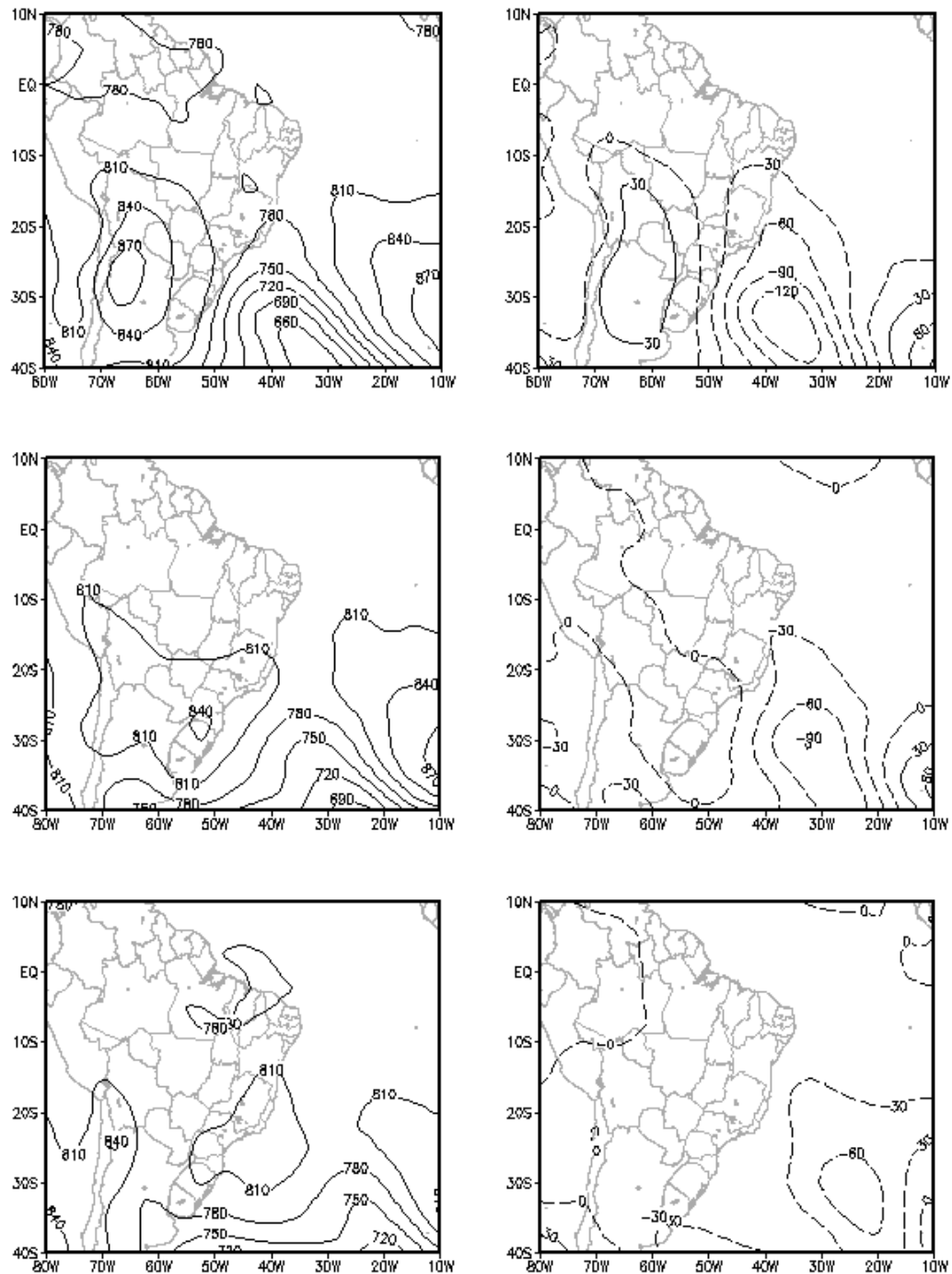


Figura 5.16: Altura Geopotencial para D-1 (topo), D (meio) e D+1 (em baixo).

Evento 17 da tabela 5.1: 24-26 de maio de 2007.

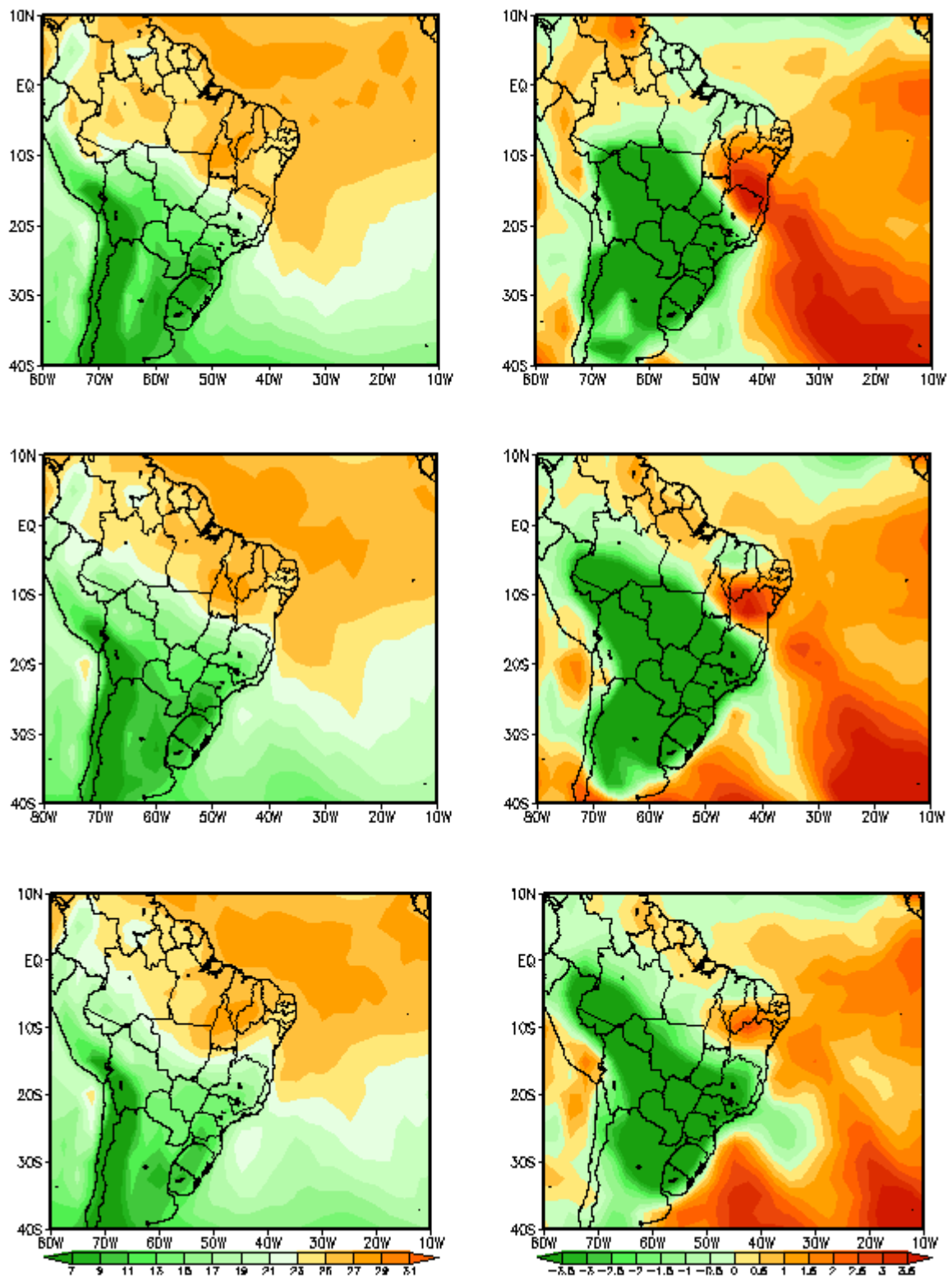


Figura 5.17: Como na figura 5.16, exceto para a temperatura, em °C.

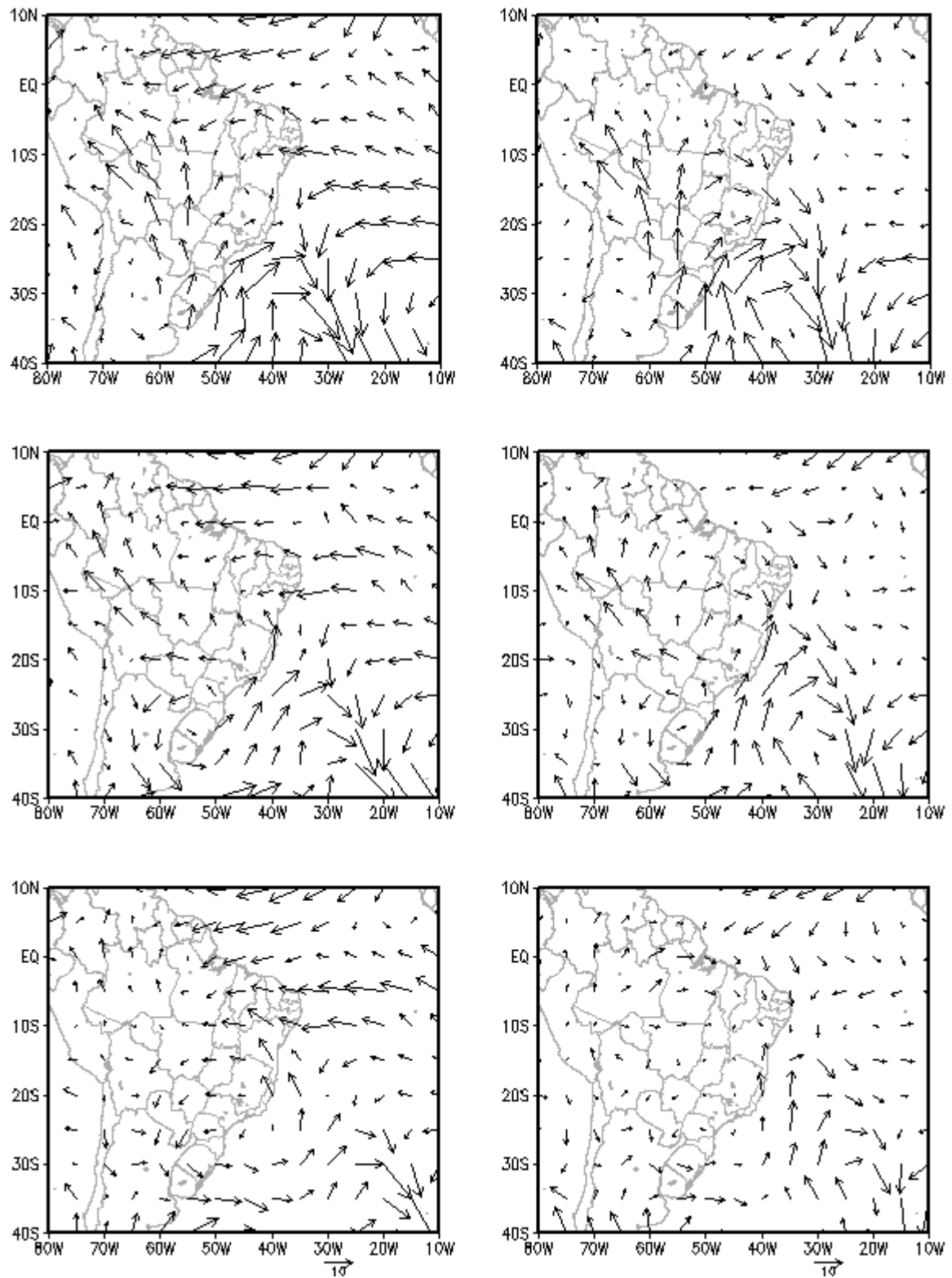


Figura 5.18: Como na figura 5.16, exceto para os campos de ventos, em m/s.

Nos casos estudados pode-se perceber padrões semelhantes nos campos compostos e de anomalias. Percebe-se, principalmente, que os campos de ventos apresentam-se semelhantes em todos os casos, com fortes ventos predominantes de sul em D-1 e D e o enfraquecimento dos mesmo em D+1 indicando a dissipação do sistema frontal.

De forma semelhante também os campos de temperatura pode-se observar a avanço da massa de ar frio através da queda de temperatura desde d-1 até d+1, onde a mesma, toma toda a região central e sul da Amazônia indicando a chegada da friagem.

CAPÍTULO 6

6.1. ESTUDO DE CASO : Descrição do Evento

Para avaliar o desempenho do Modelo Regional Eta em simular (ou não) friagens na região sul e central da Amazônia, foi escolhido um caso que atingiu a cidade de Manaus nos dias 16 e 17 de julho de 2010. A escolha de tal evento, se deve ao fato do mesmo ter sido o mais recente no período de 2001 a 2010 e se destacou pelo impacto causado, principalmente, na temperatura da região Amazônica.

O estudo observacional das variáveis: Temperatura, Pressão ao Nível Médio do Mar e Umidade Relativa, foi realizado através dos dados do NCEP, e da Precipitação através dos dados do satélite TRMM. As simulações foram feitas através do Modelo Regional Eta para previsão de tempo conforme descrito na tabela 4.1. Em seguida, calculou-se os indicadores estatísticos: Erro Médio (EM) e Erro Médio Quadrático (REQM) para as variáveis temperatura, pressão e umidade relativa e a eficiência para a precipitação. O objetivo desses índices é avaliar o desempenho do modelo na recriação do episódio de frente fria que adentrou a região Amazônica causando bastante friagem.

A figura 6.1 apresenta uma Frente fria sobre os estados de Mato Grosso (MS), São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ) que pode ser identificada pela massa de ar frio (tonalidade levemente branqueada) ao sul sobre Paraguai, Argentina e Região Sul do Brasil e massa de ar quente ao norte (tonalidade escura), no dia 15 as 12Z.

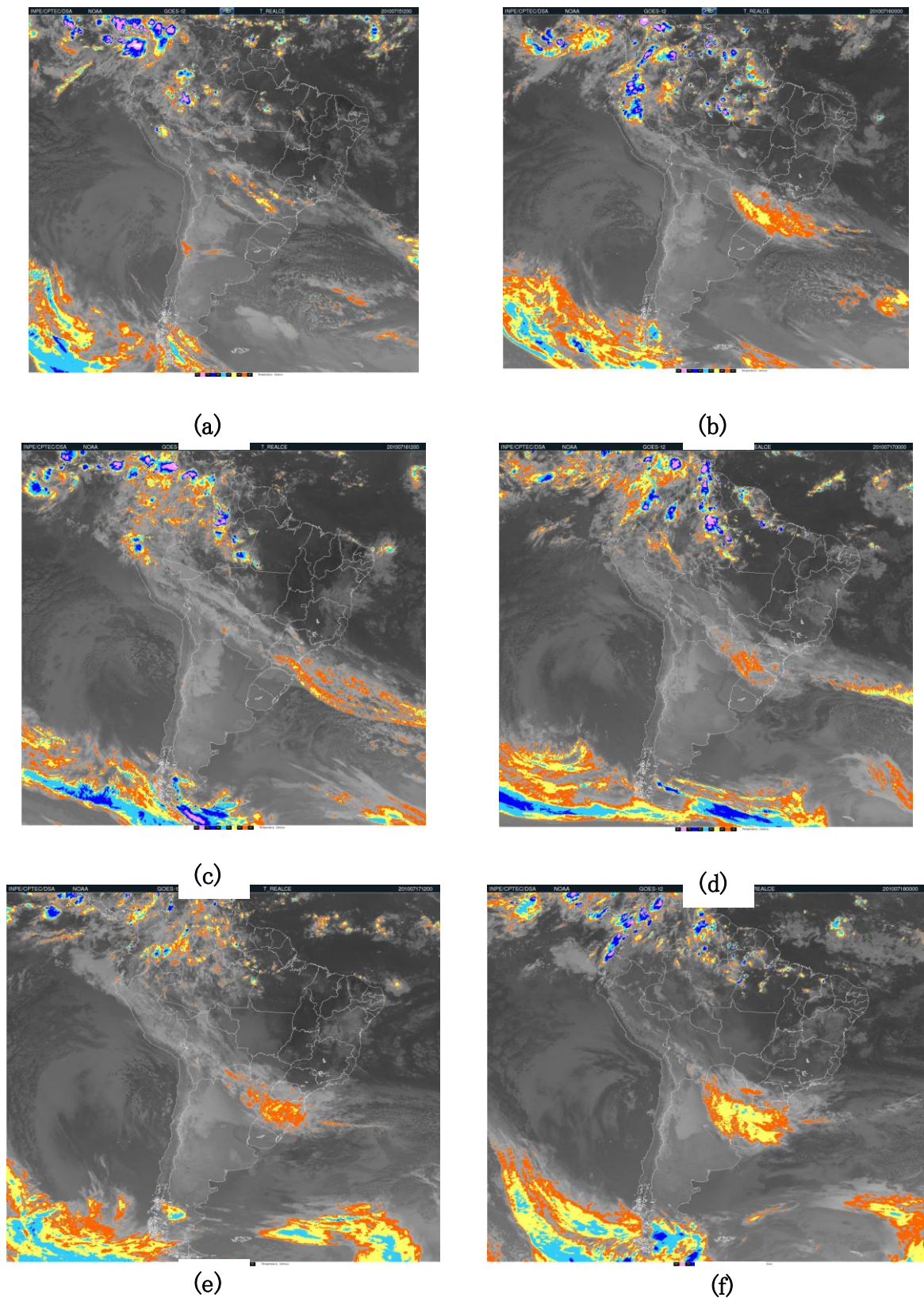


Figura 6.1: Imagens do Satélite GOES no canal realçada, para os dias 15/07/2010 às 12h UTC (a), 16/07/2010 às 00h UTC (b), 16/07/2010 às 12h UTC (c), 17/07/2010 às 00h UTC (d), 17/07/2010 às 12h UTC (e) e 18/07/2010 às 00h UTC (f).

Na Região Norte e adjacências a oeste de 55°W apresentam atividade convectiva (manchas azuis de pequena escala) nas próximos 24 horas. Alargamento da faixa de nebulosidade sobre MS e Paraná (PR) no dia 16 as 00Z indica o princípio de uma onda frontal de mesoescala. A onda se desloca para leste nos próximas 24 horas. No dia 17 as 00Z, inicia-se o desenvolvimento de uma segunda onda sobre a Região Sul. No dia 17 as 12Z pode ser observada, pela tonalidade branca, o avanço da massa do ar frio para a Região Norte, afetando os trópicos e regiões equatoriais da América do Sul a oeste de 55°W. Durante o período das imagens pode ser visto o deslocamento de uma onda extratropical sobre o sul do continente.

A figura 6.2 apresenta as anomalias de vorticidade relativa em 850 hPa (coluna a esquerda) e em 200 hPa (colunas da direita) para os dias D-1 (em cima), D (no meio) e D+1 (em baixo) desse evento. Observa-se vorticidade ciclônica (tonalidade azul) predominante, em 850 hPa, durante os três dias, sendo que em D-1 e D ela é mais intensa que em D+1. Esta anomalia está associada com a passagem da frente fria ocupando uma área que se estende desde a região Sul até o noroeste da Bacia Amazônica.

Na alta troposfera a anomalia anticiclônica situa-se praticamente sobre a anomalia ciclônica em baixo nível, característica típica da presença de ar quente na média troposfera na região ao norte de 20°S sobre o continente sul americano. Isto significa que, embora o ar frio penetre na bacia Amazônica próximo a superfície, a média troposfera é aquecida o que torna uma camada muito estável. A distribuição da vorticidade observada na figura 6.2 assemelha-se aquela vista na figura 5.10.

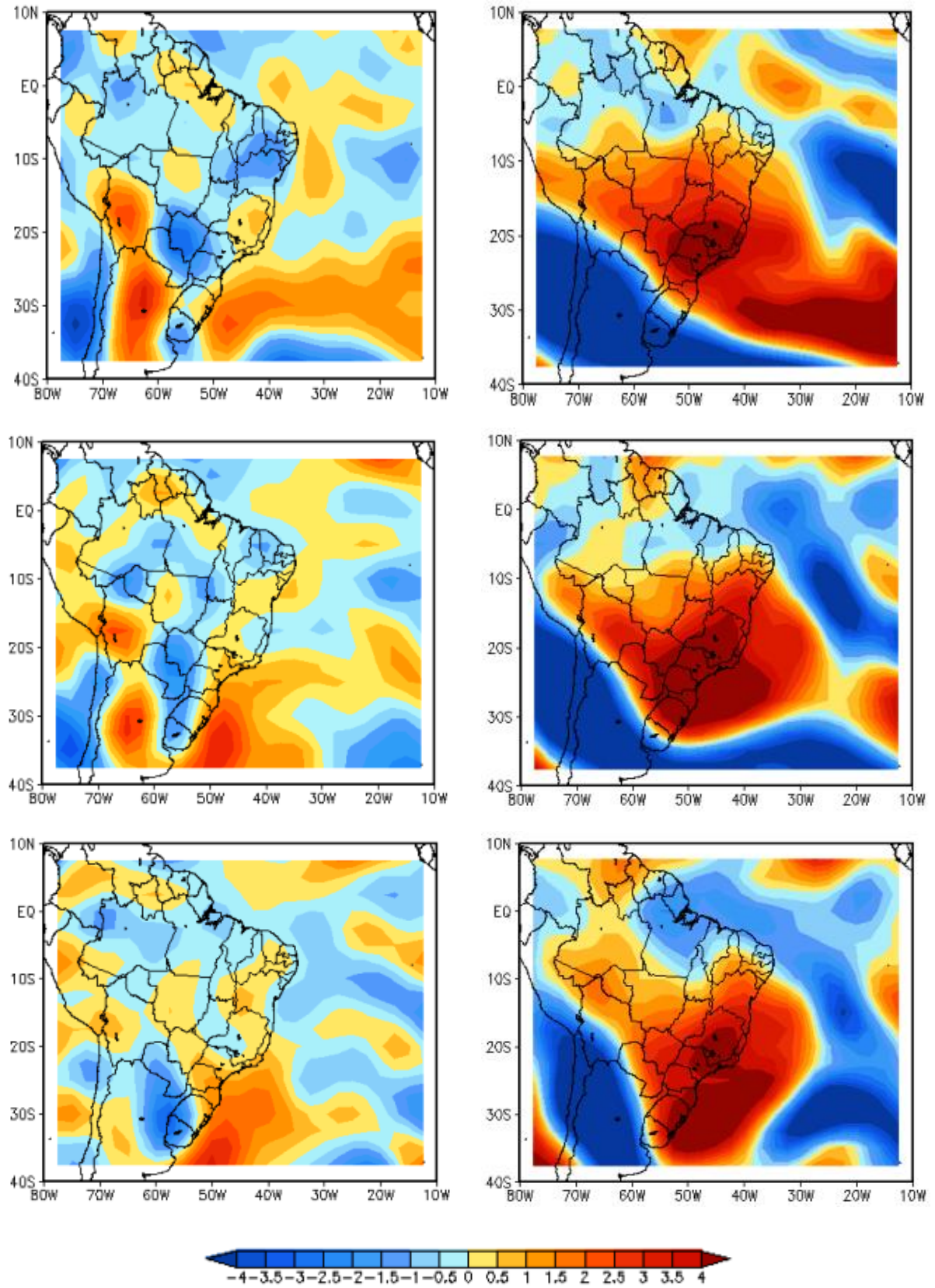


Figura 6.2: Vorticidade Relativa em 850 hPa (coluna a esquerda) e em 200 hPa (coluna a direita) em D-1 (acima), D (meio) e D+1 (em baixo) do evento de friagem 24 da tab. 5.1.

6.1.1. Diagnóstico do Campo de Deformação

As análises realizadas nesta seção referem-se às figuras 6.3 a 6.6. Nestas são apresentados os campos de Deformação, Gradiente Térmico, Advecção de Temperatura e Função Frontogenética, que mostram a evolução da frente fria durante os dias D-2, D-1, D e D+1 da ocorrência do evento.

Uma característica marcante nas frentes térmicas, em particular das frias, sobre a América do Sul é que as mesmas são orientadas ao longo dos eixos de contração, alinhada no sentido NW-SE. Assim sendo, para o cálculo da deformação, utilizou-se aquela que assumiu essa orientação, representada pela equação 3.3.

As figuras 6.3 a 6.6 apresentam, em (a), a predominância de valores negativos nas regiões sul e central da Amazônia desde D-2 até D+1, valores esses que se intensificaram em D e persistiram em D+1 do evento. Evidenciando a chegada da frente fria sobre a região.

As figuras 6.3 a 6.6 apresentam, em (b), a evolução do Gradiente Térmico para esses dias. Em todos os dias pode-se perceber que a orientação do vetor gradiente está para nordeste da região, ou seja, a temperatura aumenta no sentido nordeste e diminui para sudoeste. No dia D percebe-se um aumento na magnitude dos vetores sobre o Amazonas, indicando a intensificação da zona frontal, consequência da massa de ar frio adentrando a região. No dia D+1, essa magnitude diminui mostrando a dissipação da frente.

A Advecção Térmica está representada nas figuras 6.3 a 6.6 em (c), a expressão utilizada para calcular a mesma é a equação 3.7. Pode-se observar a predominância de valores negativos no sul da Amazônia durante todo o período observado, isso se deve a incursão de ar frio vindo do sul, características de frentes frias, na qual temos uma mudança na componente

meridional do vento fazendo com que tenhamos a chegada de ventos mais frios sobre a região.

Usando a Função Frontogenética de Petterssen, visto em 3.8, tem-se que valores positivos indicam Frontogênese ou fortalecimento da frente fria, caso contrário temos a Frontólise.

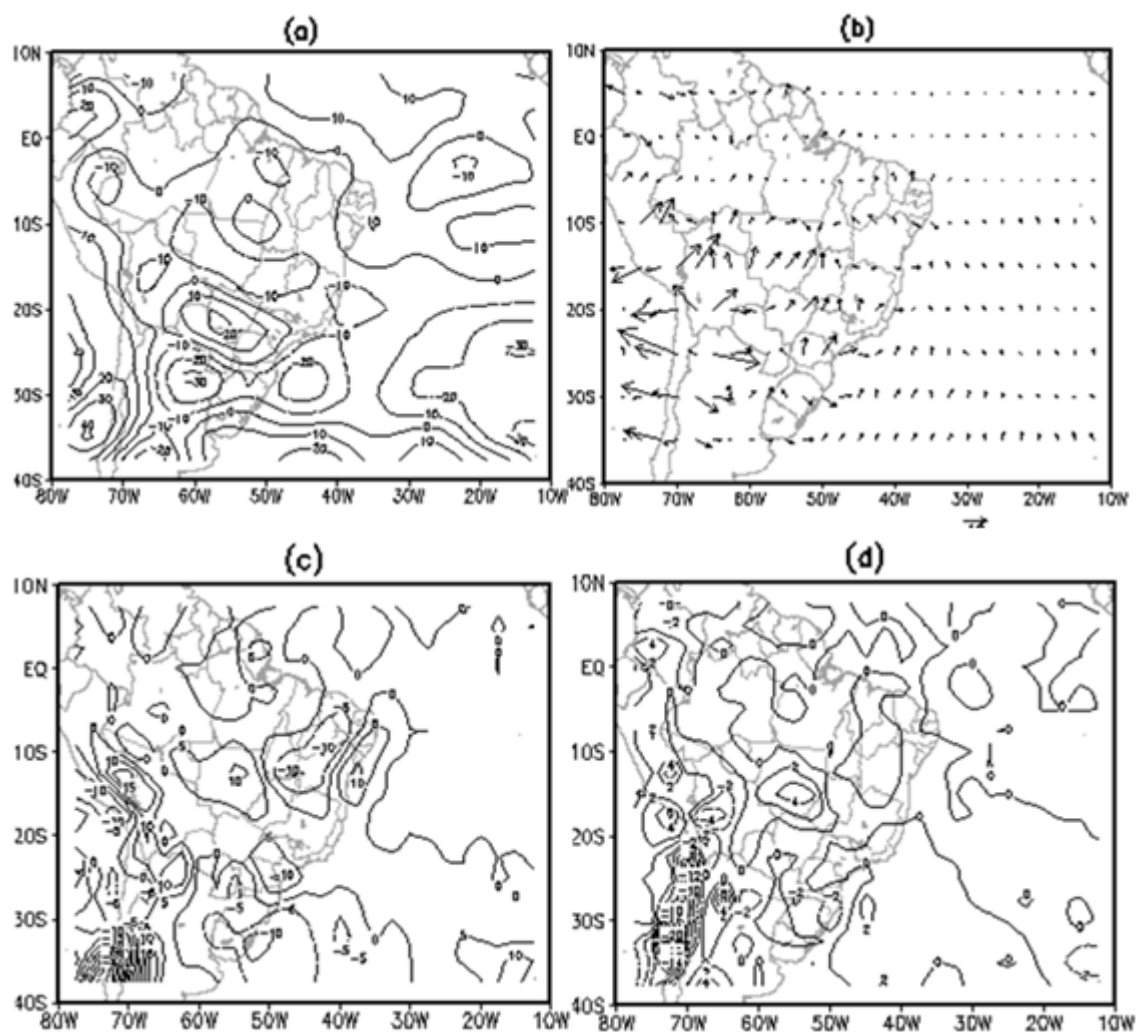


Figura 6.3: Deformação em 10^{-6} s^{-1} em (a); Gradiente Térmico em $\text{K}/1000 \text{ km}$ em (b); Adveção Térmica em $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}.\text{s}^{-1}$ em (c) e Função Frontogenética em $10^{-6} \text{ km}^{-1}.\text{s}^{-1}$, para o dia 15 de julho de 2010, em 850 hPa.

Observa-se nas figuras 6.3 a 6.6 (d), que entre D-2 e D no sul da Amazônia, frontogênese, devido a predominância dos valores positivos e no dia D+1 esses valores encontram-se negativos ou nulos, ou seja, frontólise, caracterizando a dissipação do sistema frontal frio. As figuras a seguir mostram essa evolução.

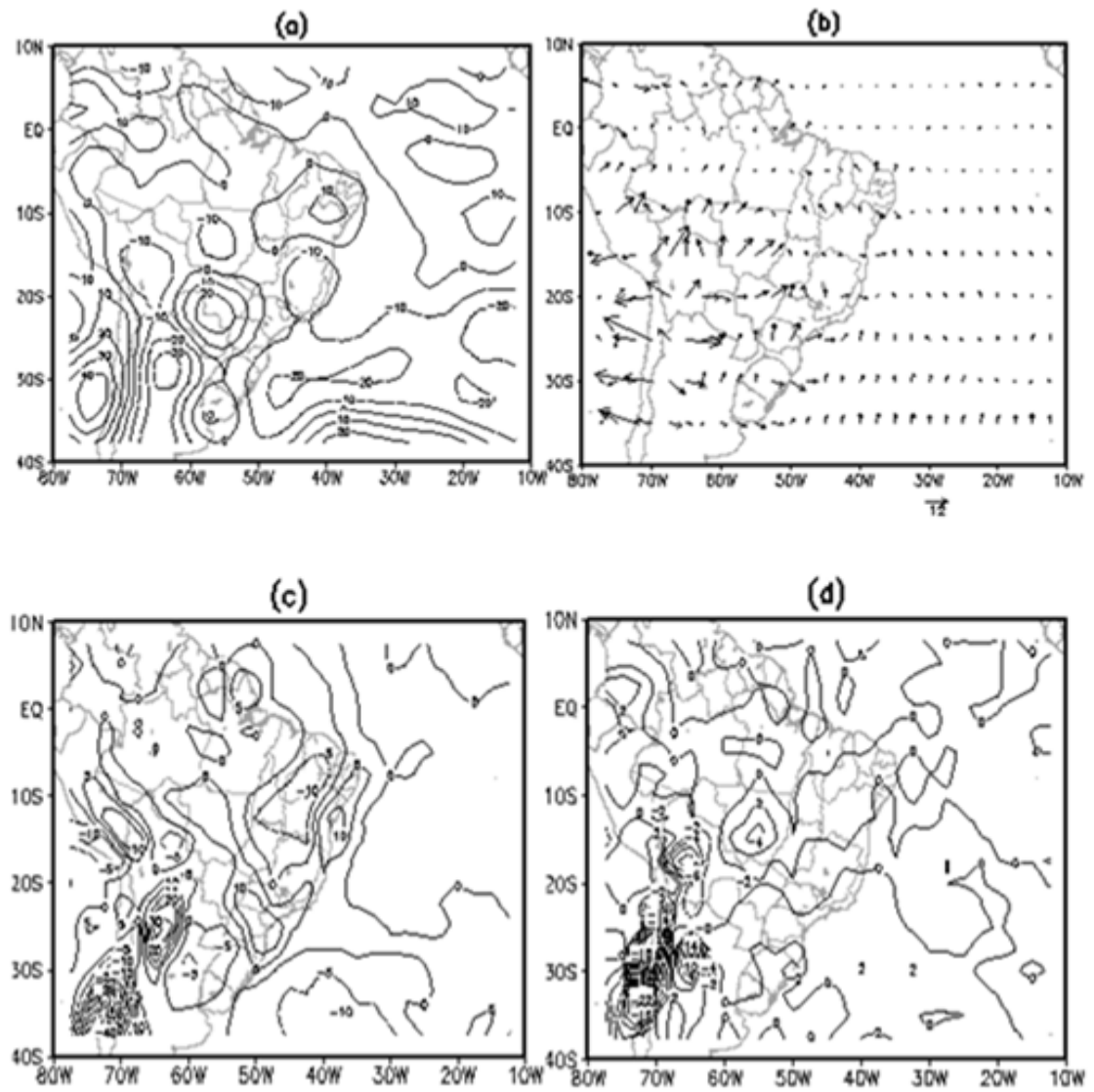


Figura 6.4: Conforme fig. 6.2, exceto para 16 de julho de 2010.

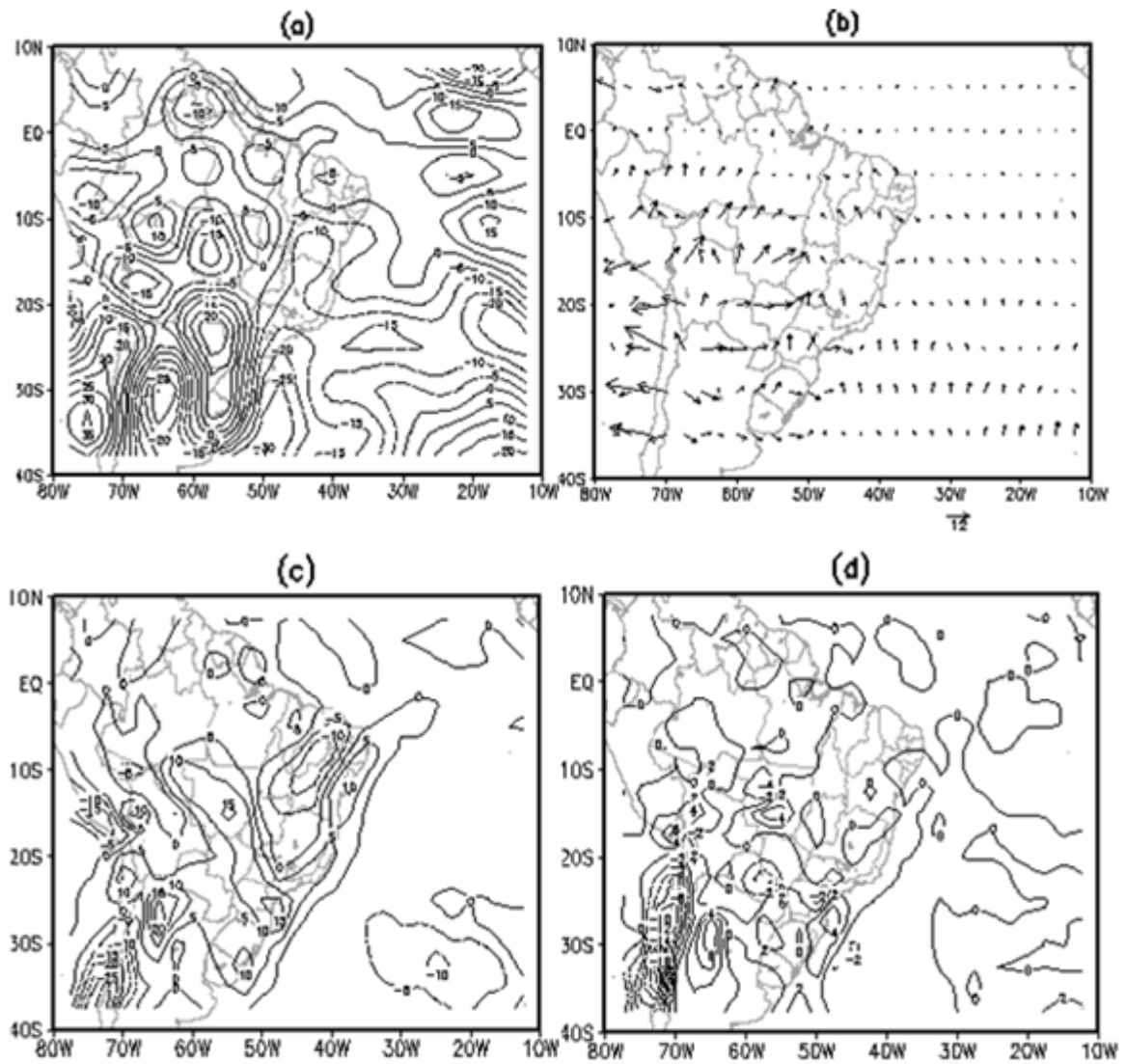


Figura 6.5: Conforme fig. 6.2, exceto para 17 de julho de 2010.

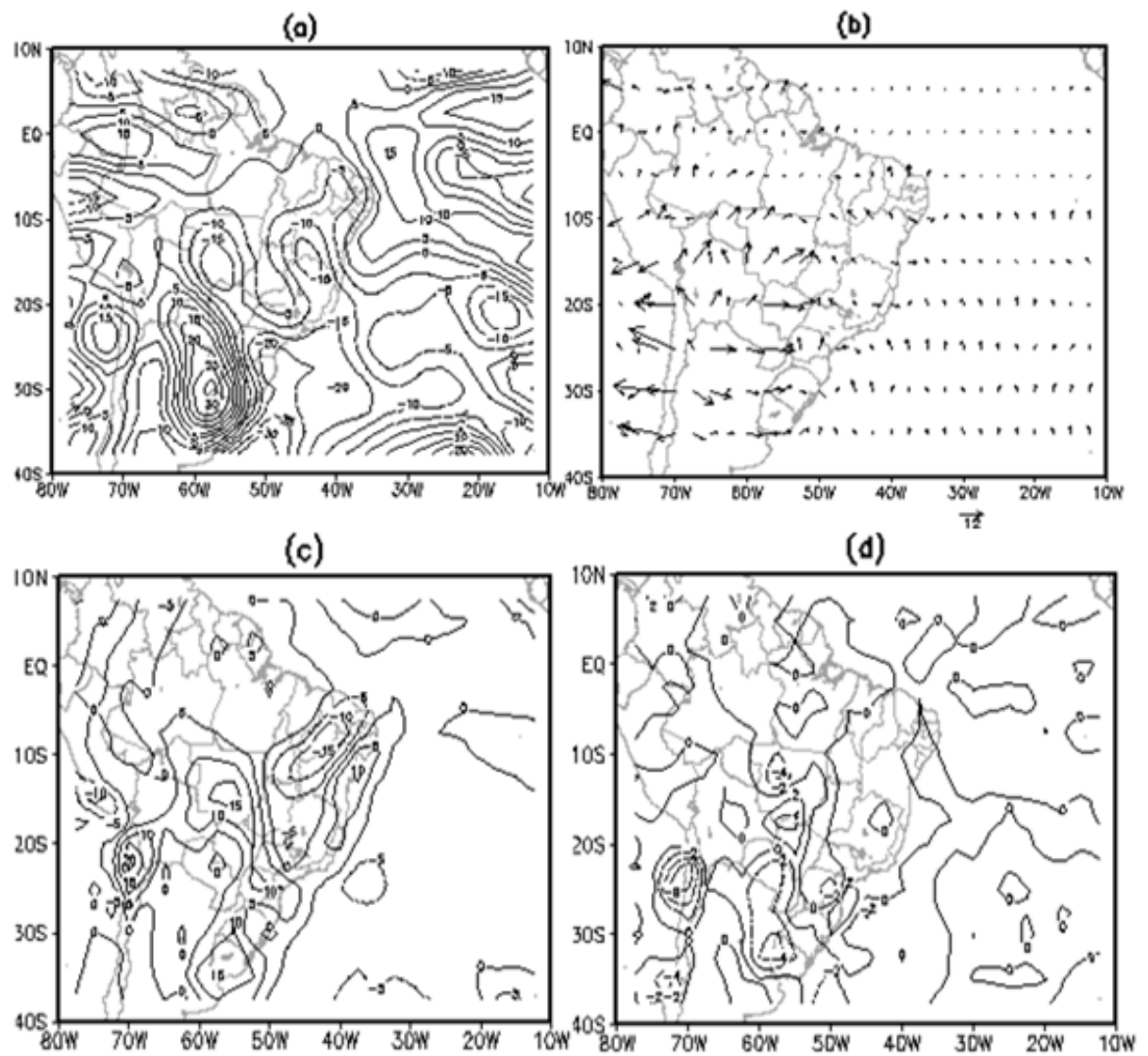


Figura 6.6: Conforme fig. 6.2, exceto para 18 de julho de 2010.

6.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Sabe-se que o modelo é uma tentativa de simular diversos processos que ocorrem na atmosfera em geral. Entre os principais componentes do modelo está a física, que incorpora esquemas especializados que tratam dos diferentes processos de subgrade do mesmo. E entre os principais processos físicos está a convecção, onde a água na atmosfera é tratada através da representação dos processos de formação e distribuição de nuvens e precipitação.

Os fenômenos que ocorrem num sistema de tempo e clima, ocorrem em grande escala espacial e temporal. Enquanto algumas circulações na atmosfera estendem-se para escalas superiores a milhares de quilômetros, os escoamentos turbulentos na camada limite tem dimensões da ordem de centímetros ou metros e não são resolvidos explicitamente pela grade do modelo. Dessa forma necessitam ser parametrizados, ou seja, representados por meio de variáveis dependentes de tal forma que seu efeito médio seja captado. Entre os principais processos parametrizados nos modelos estão a formação de nuvens e a convecção de cúmulus, rasa e profunda.

Para parametrizar esses processos descritos, o modelo regional Eta em operação no CPTEC traz as parametrizações de Betts-Miller e Kain-Fritsch com fluxo de momento (Mesinger, 2012).

O esquema de Kain-Fritsch baseia-se na hipótese que a energia disponível para convecção (CAPE) pode ser usada para regular a quantidade de convecção num elemento da grade do modelo. Este esquema modela a troca de massa entre o ambiente e a nuvem como uma função das características de impulsão de várias misturas de ar limpo e nublado. Formulado para assegurar conservação de massa, energia térmica, umidade e fluxo de momento, sendo bastante útil para grades de 20-30km (Kain e Fritsch, 1990).

No esquema de Betts-Miller, a convecção pouco profunda transporta umidade para cima e mantém inversões de temperatura. A convecção profunda transporta calor e umidade para os níveis superiores e produz precipitação. Os perfis verticais de temperatura e umidade específica são comparados com perfis oriundos de numerosas observações efetuadas na região tropical em situações de bom tempo. Os perfis do modelo são então relaxados para os perfis de referência. A precipitação é deduzida da variação negativa da umidade específica no modelo de convecção profunda, se esta variação for positiva, ou seja, ocorre evaporação e não condensação e não é realizado nenhum ajuste às variáveis naquele ponto. Este esquema é útil para escalas superiores a 30 *km*, mas não em simulações de condições severas (Betts e Miller, 1986).

O objetivo das simulações numéricas usando o modelo regional Eta é avaliar qual das duas parametrizações convectivas consegue recriar de maneira satisfatória o perfil médio da atmosfera durante a passagem de uma frente fria sobre a região Amazônica.

6.2.1. Avaliação da Temperatura

Através do Modelo de Previsão Numérica de Tempo Regional Eta, possibilitou-se simular o evento em estudo (caso 23 da tabela 5.1), que se refere a passagem da frente fria na Amazônia. A primeira rodada foi do dia D-4 até o dia D+3, a segunda do dia D-3 ao dia D+3, a terceira do dia D-2 ao dia D+3 e a última do dia D-1 ao dia D+3. O dia da chegada do evento é considerado o dia D. Vale ressaltar que a área de integração numérica compreende toda a América do Sul e não somente a região Amazônica, mas as análises que seguem dizem respeito a área de estudo definida na fig. 3.1.

A figura 6.7 mostra a evolução da temperatura observada e simulada usando as parametrizações BM e KFm.

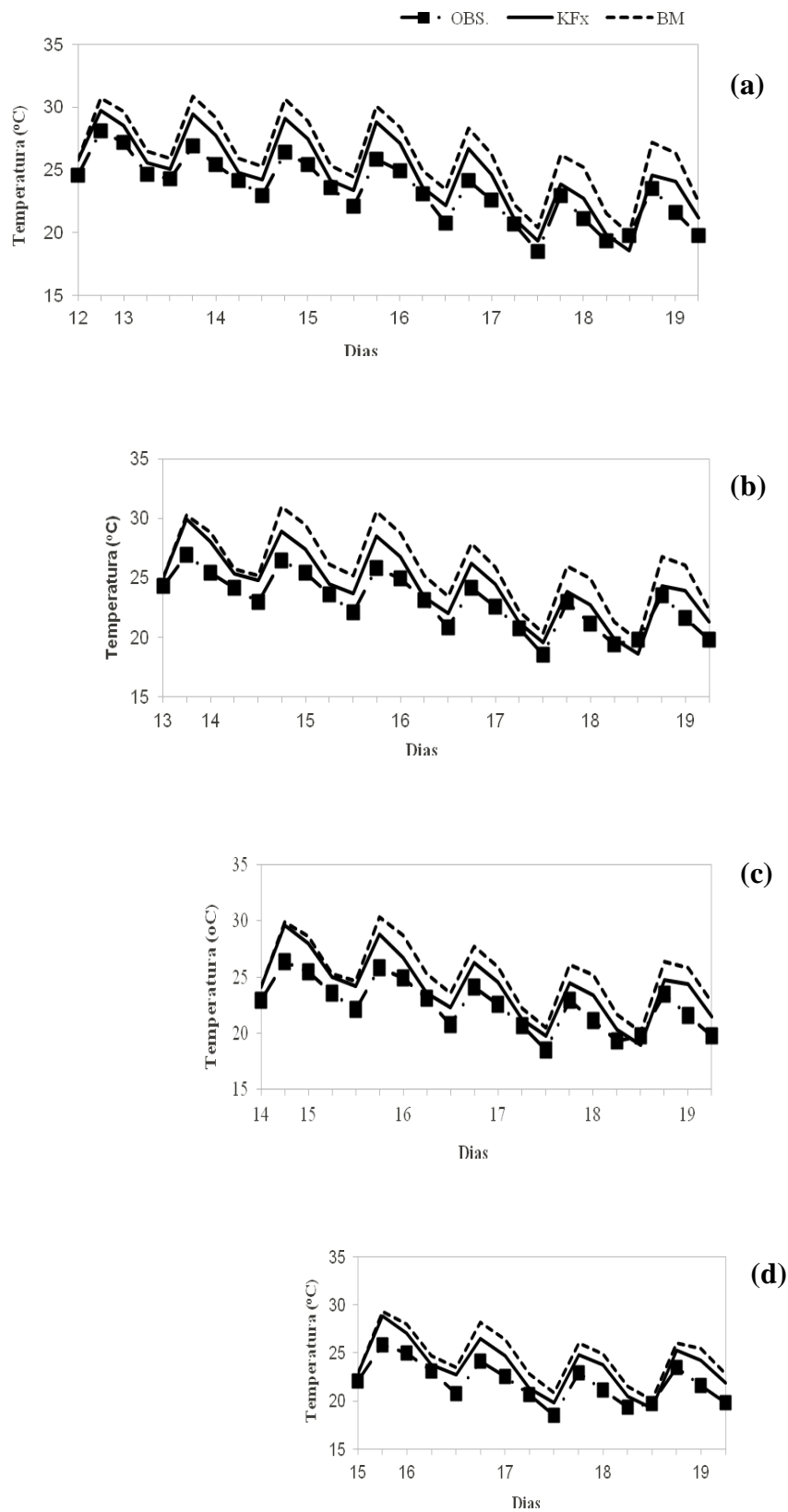


Figura 6.7: Ciclo diário da temperatura comparando Observação e Simulações com as parametrizações BM e KFm, para o período: (a) D-4 a D+3, (b) D-3 a D+3, (c) D-2 a D+3 e (d) D-1 a D+3.

A chegada da frente fria é identificada por uma diminuição na temperatura mínima desde o dia 13 até o dia 17. A maior queda ocorre no dia 16 atingindo o seu valor mínimo no dia seguinte. Essa variação foi de mais de 6°C entre os dias 13 e 17. No dia 18 a temperatura começa a aumentar mantendo essa tendência para os dias subsequentes.

Observa-se primeiramente, que a variação diurna da temperatura na superfície é reproduzida nas simulações pelas duas parametrizações. Todavia, nota-se que as temperaturas máximas e mínimas, e em geral as temperaturas são superestimadas pelo modelo. A superestimação é maior nas simulações com a parametrização BM enquanto KFx aproxima melhor as observações.

Como a temperatura máxima é sensível a absorção da radiação de onda curta, sugere-se que BM permite maior fluxo de onda curta incidente na superfície. A razão deve-se a menor nebulosidade e umidade.

Para avaliar o desempenho do modelo, calculou-se o Erro Médio (EM) e os resultados seguem representados na figura 6.8.

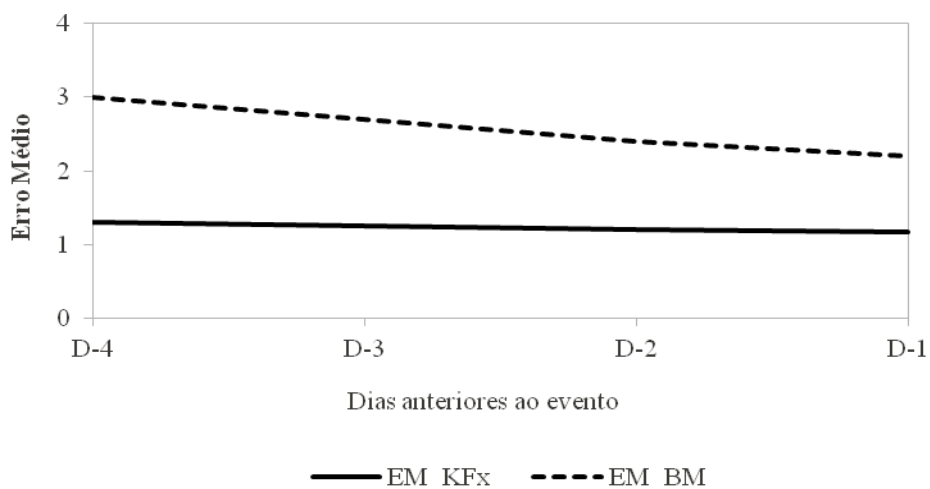


Figura 6.8: Erro Médio, para a variável Temperatura, nas simulações até quatro dias antes da ocorrência do episódio de friagem.

Nota-se que os erros encontrados nas simulações são da ordem de 1 a 2°C no modelo usando a parametrização KFm e da ordem de 2 a 3°C usando BM e, ambas apresentam diminuição do erro à medida que se aproxima do evento, que é o esperado pois quanto mais próximo do evento melhor a previsibilidade. As previsões de 4 dias antes do evento mantêm-se praticamente constante com KFm o que é um bom indicativo de recriação para o evento. Em ambas as parametrizações esse comportamento foi observado. Todavia o erro em BM é quase o dobro do erro com KFm.

6.2.2. Evolução da Pressão

Apesar de não ter utilizado a pressão atmosférica como critério na identificação desses sistemas sinóticos para a região tropical, estudou-se o ciclo diário da mesma com o objetivo de avaliar a coerência do modelo na recriação da friagem. Os resultados apresentam-se juntamente com as simulações do modelo.

Observa-se na figura 6.9 um aumento da pressão desde o dia 13 anterior à passagem do sistema frontal. O maior aumento ocorre nos dias 16 e 17, onde a variação de pressão chega a ser próximo de 3hPa, a partir daí tende a estabilizar-se.

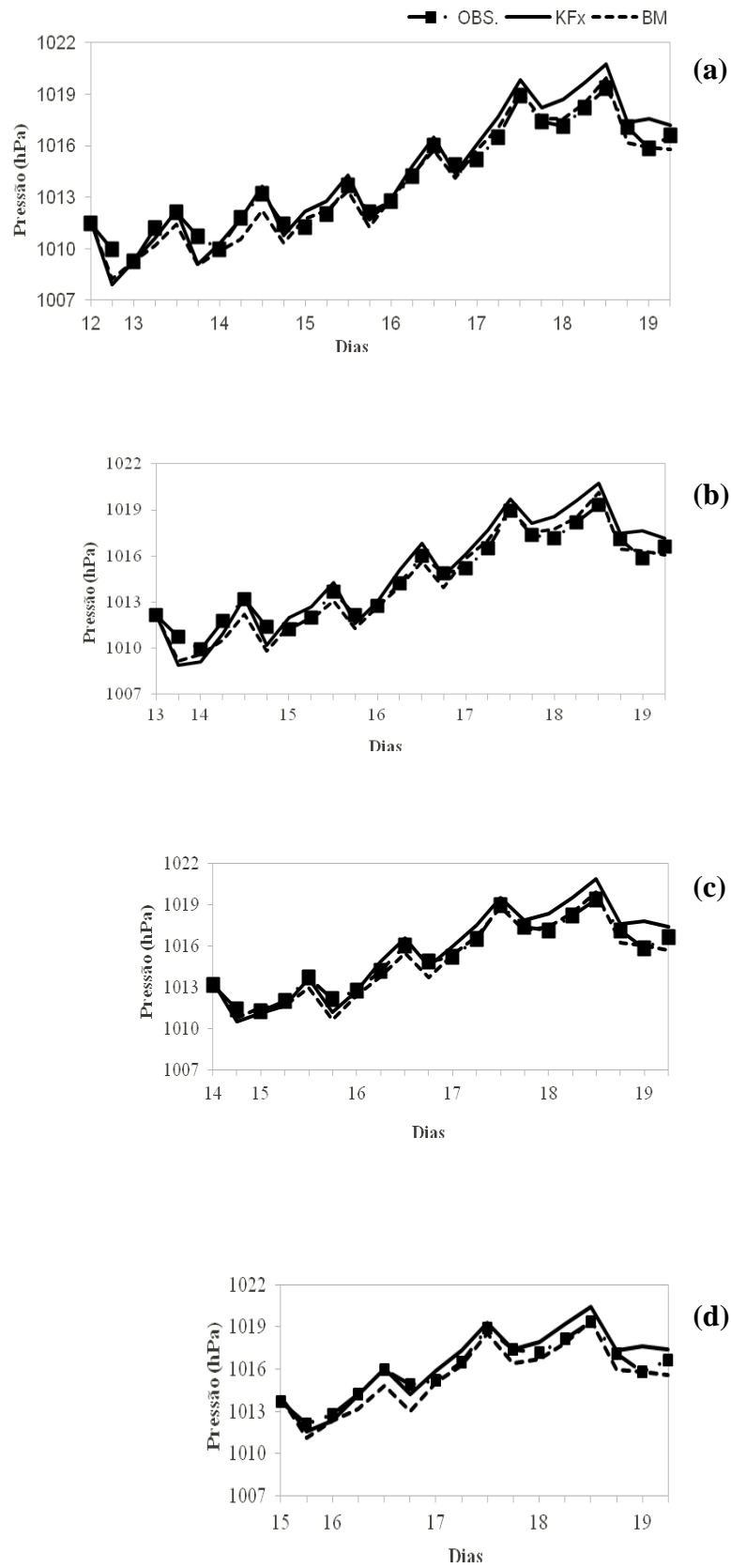


Figura 6.9: Observação e Simulações usando as parametrizações convectivas BM e KFx para a PNM no período: (a) D-4 a D+3, (b) D-3 a D+3, (c) D-2 a D+3 e (d) D-1 a D+3.

Encontra-se uma evolução da PNM bem representada pelo Modelo tanto na parametrização de Betts-Miller como na Kain-Fritsch com fluxo de momento nos seu ciclo diário. Embora as simulações do modelo, em ambas as parametrizações, se alternem em subestimativas e superestimativas durante a evolução. Essa boa representação da pressão se deve a pouca variabilidade da mesma nas regiões tropicais.

Comparando-se as figuras 6.7 e 6.9 nota-se que a medida que a pressão aumenta a temperatura diminui, mostrando o efeito da invasão da Amazônia por uma massa de ar frio. Percebe-se ainda que o modelo consegue recriar essa evolução que é característica durante os episódios de frentes frias.

Os indicadores estatísticos, o Erro Médio e o Erro Médio Quadrático foram calculados e representados para a PNM para avaliar as simulações realizadas pelo modelo. As figuras 6.10 e 6.11 descrevem esses resultados.

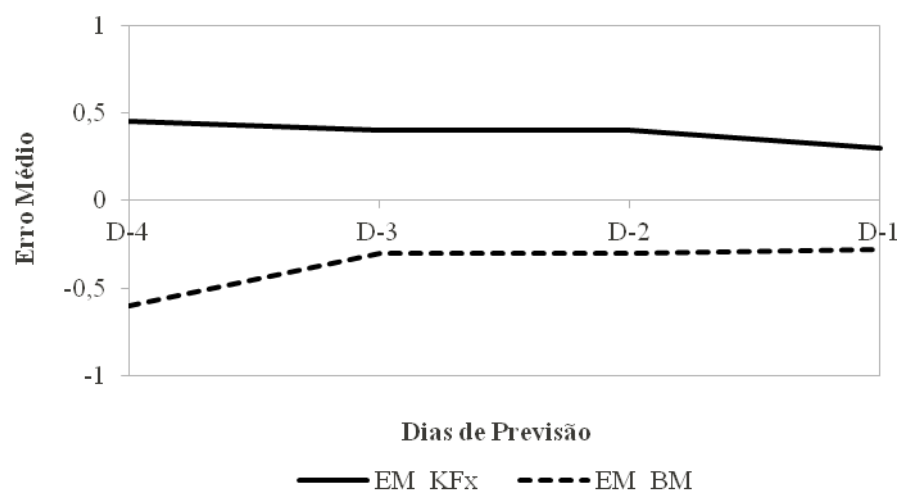


Figura 6.10: Erro Médio das previsões usando os parâmetros BM e KFm para a PNM.

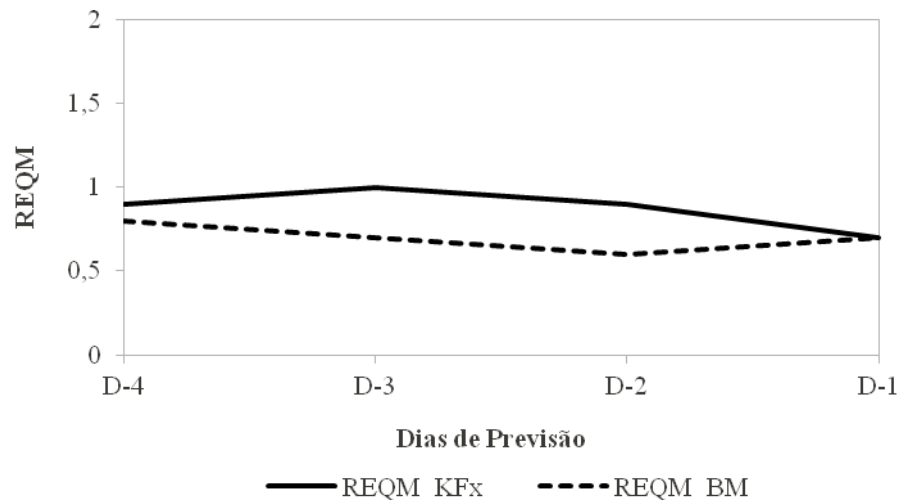


Figura 6.11: Erro Médio Quadrático (REQM) da PNM usando as parametrizações BM e KFm.

Observa-se, nas figuras 6.10 e 6.11, que a parametrização KFm superestima e BM subestima a PNM praticamente nos mesmos valores, que são da ordem de 0 a 0,5 hPa e 0 e -1, respectivamente. Todavia o erro com a parametrização KFm diminui à medida que se aproxima do dia D enquanto com BM aumenta ligeiramente. O Erro Médio Quadrático (REQM) visa mostrar a magnitude dos erros, que são da ordem de 0,5 hPa e pode ser observado na figura 6.11.

6.2.3. Evolução da Umidade

O modelo apresentou uma grande deficiência na simulação da umidade relativa (RH) conforme se observa na fig. 6.12. As Simulações representaram bem as variações diurnas. Todavia, é subestimada, em ambas as parametrizações, pelo modelo. A parametrização BM apresenta uma diferença de mais de 20% enquanto KFm em torno de 15%. As observações mostram que no momento da chegada da frente fria, entre os dias 16 e 17, a umidade manteve-se alta indicando a ocorrência de chuvas, o que de fato ocorreu no período. De acordo com dados do INMET, estação de Manaus, ocorreu 13,9 mm de precipitação para esse

dia, ainda assim um valor acima da média para o período.

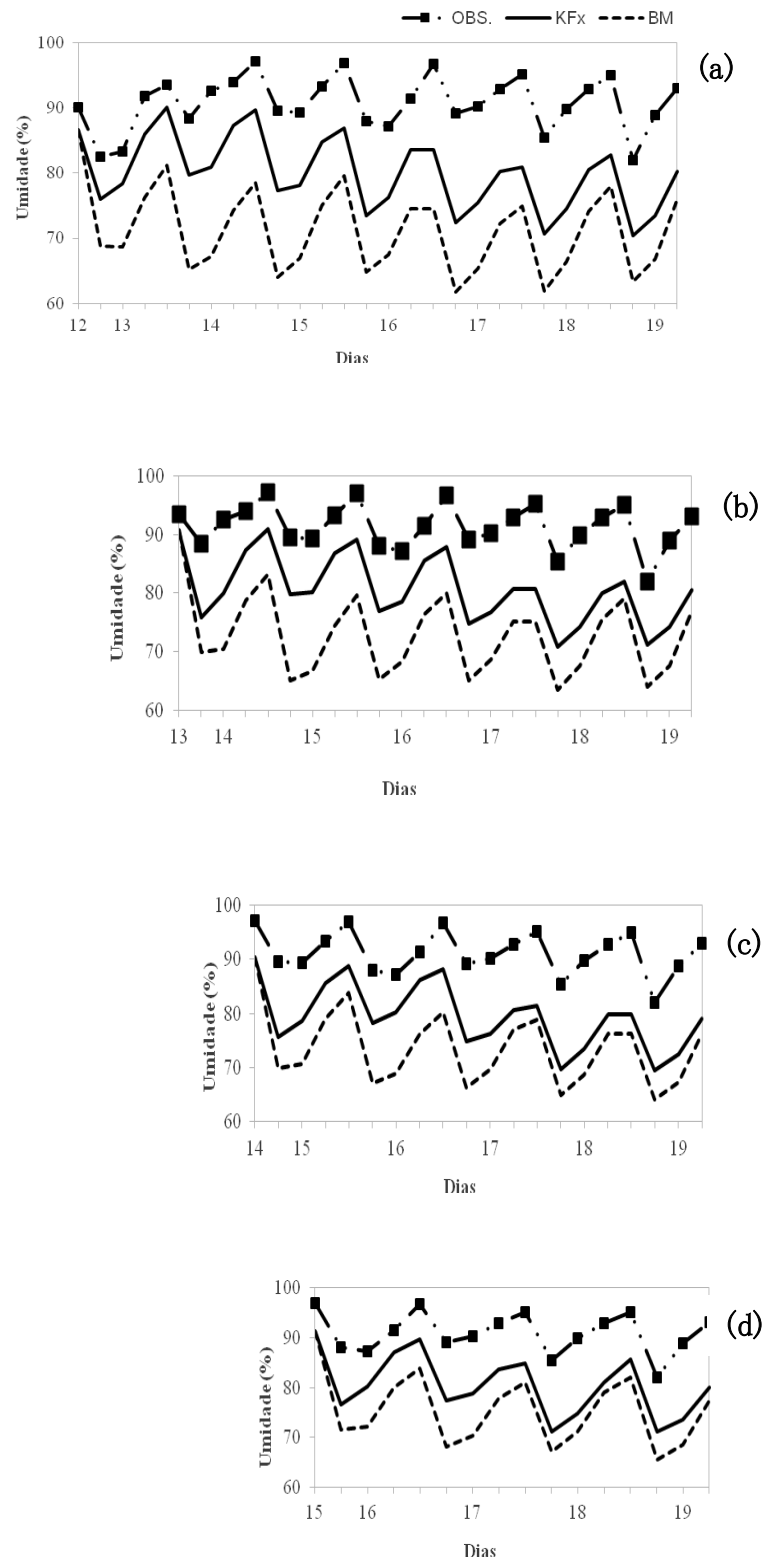


Figura 6.12: Observação e Simulações usando as parametrizações convectivas BM e KFx para a Umidade Relativa no período: (a) D-4 a D+3, (b) D-3 a D+3, (c) D-2 a D+3 e (d) D-1 a D+3.

Avaliando-se o Erro Médio (EM) e o Erro Médio Quadrático (REQM) da variável Umidade Relativa, observa-se que ambas as parametrizações subestimaram a medida, mas Kain-Fritsch subestimou menos, em relação a Betts-Miller. Isso mostra que o modelo com a parametrização BM apresenta alguma deficiência maior em representar a umidade. Esse erro se deve a dificuldade que os modelos têm em representar corretamente o papel da floresta ou regiões montanhosas, que possuem papel fundamental no fluxo de umidade na Amazônia. Estudos futuros, buscando entender perfeitamente como as parametrizações convectivas equacionam os processos físicos da atmosfera, são importantes. As figuras 6.13 e 6.14 mostram essas análises.

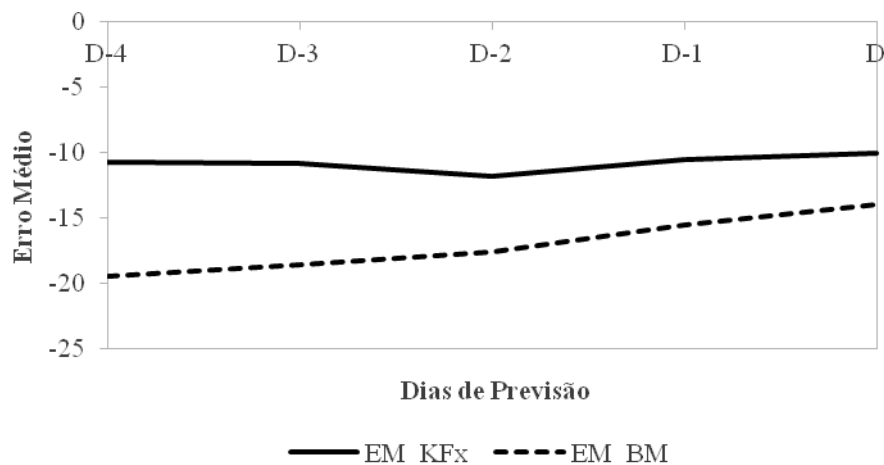


Figura 6.13: Erro médio para a variável umidade relativa com as parametrizações KFx e BM.

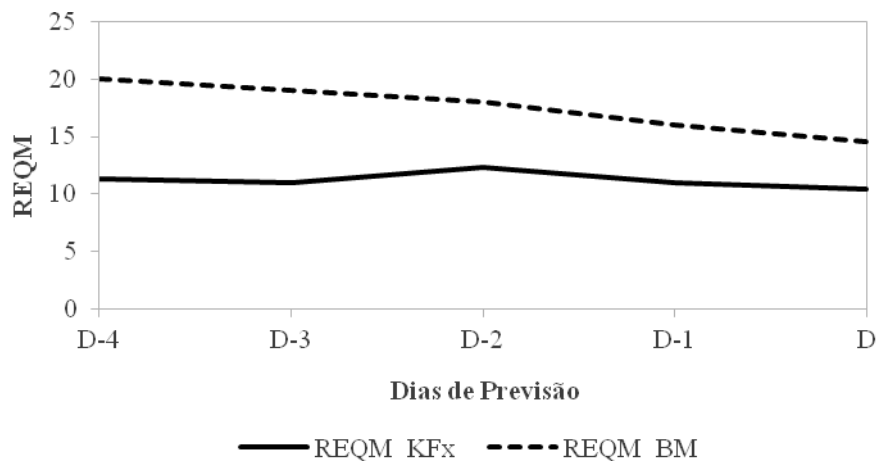


Figura 6.14: Erro Médio Quadrático (REQM) para a variável umidade relativa com as parametrizações KFx e BM.

A figura 6.14 mostra a magnitude desses erros e, de forma mais clara que, o erro com BM é quase o dobro que KFx e que ambas mostraram uma diminuição a medida que se aproxima do dia do evento concordando com a simulação das outras variáveis meteorológicas analisadas.

6.2.4. Evolução da Precipitação

Para a análise observacional da precipitação foram utilizados dados do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). A escolha desse banco de dados para a precipitação na Amazônia se deve em função da escassez dos dados observacionais diários e por tratar de um banco com precipitação estimada por imagens de satélite, que se acredita descrever a precipitação com uma boa resolução temporal e espacial.

Nas figuras que seguem, apresentam-se a evolução da precipitação desde o dia D-2 até o dia D+1 da ocorrência do evento, ou seja, como o evento atingiu a região entre os dias 16 e 17, avaliamos do dia 15 ao dia 18.

As simulações da precipitação com condições iniciais de D-4 até D-1, juntamente com as observações são representadas nas figuras 6.15 a 6.18. Em cada grupo com três painéis são representados as simulações do modelo usando as parametrizações BM e KFm no topo e em baixo, a observação pelo satélite TRMM.

Ambos os esquemas de convecção variam muito na localização espacial, temporal e na intensidade da chuva durante o evento e nenhum dos esquemas é melhor, em relação ao outro, em todos as simulações. Em alguns casos, a parametrização BM conseguiu simular melhor em relação a KFm, a distribuição espacial e a intensidade da precipitação. Vale ressaltar que a localização espacial da chuva, ocorrendo em algumas regiões e outras não, faz com que a média sobre a região seja baixa, conforme valores apresentados na tabela 6.1.

Observa-se que a evolução da precipitação ocorre de oeste em D-2, atingindo o norte e leste do Amazonas em D-1 e D. A partir de D+1 a precipitação já está sobre o estado do Pará e norte do estado, indicando a dissipação do evento. As simulações do modelo Eta, usando as parametrizações BM e KFm, foram subestimadas e superestimadas como se pode observar nas figuras 6.15 a 6.18 e na tabela 6.1 construída a partir dessas análises.

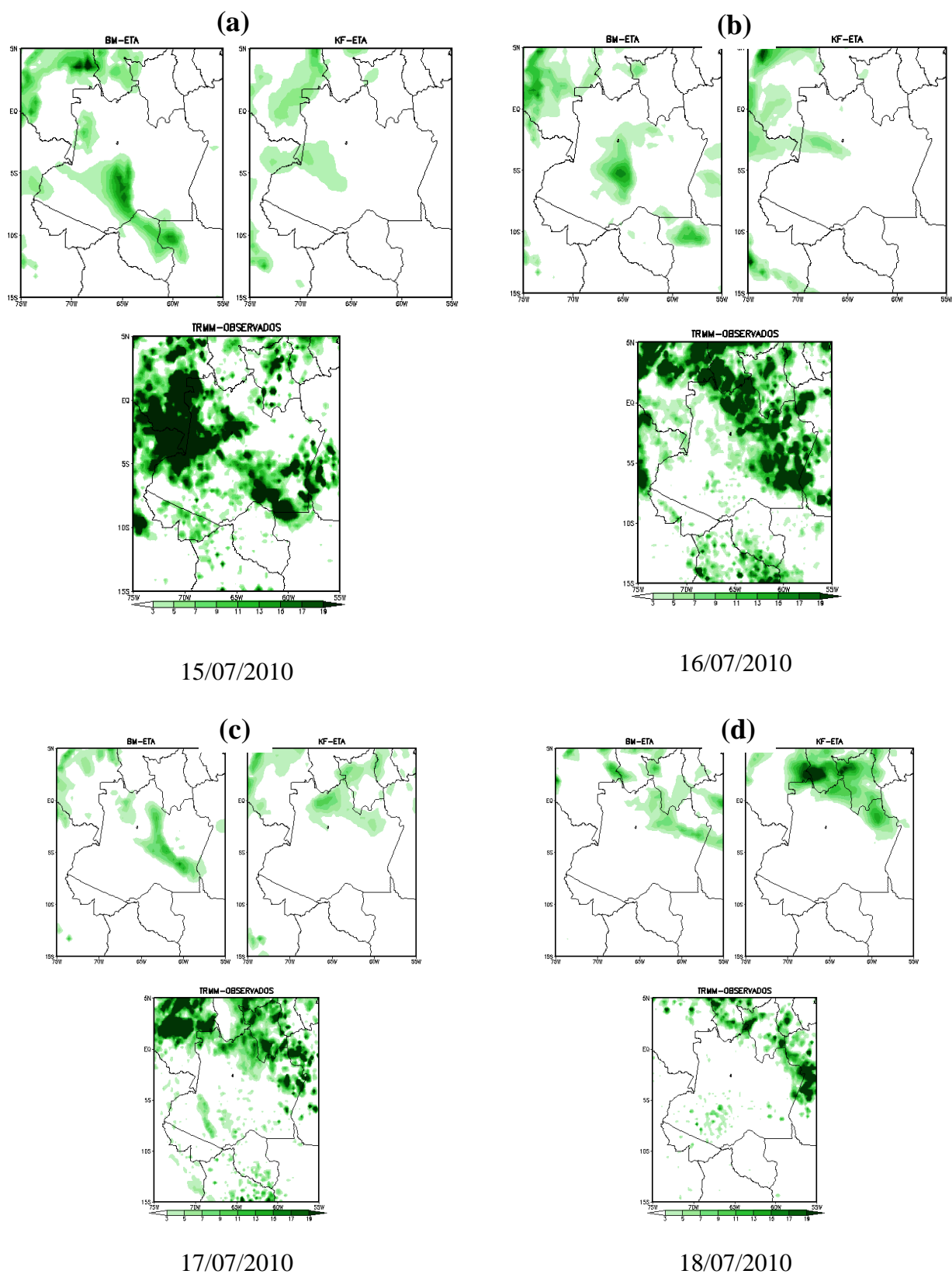


Figura 6.15: Evolução Temporal e Espacial da Precipitação com as condições iniciais do dia D-4 (13jul2010). Em cada grupo de três painéis, os resultados do modelo usando as parametrizações BM e Kfm são dados no topo e a Observação é dada em baixo.

Na figura 6.15(a) a precipitação observada foi de aproximadamente 17 mm oeste e sudeste do Amazonas em D-2, enquanto as simulações do modelo, em ambas as parametrizações, subestimaram as medidas. Quanto a localização espacial da precipitação, BM representou melhor o evento em relação a Kfm. A melhor condição inicial foi em D-1 conforme figura 6.18(a).

A precipitação observada em D-1 foi praticamente a mesma verificada em D-2. Sua localização espacial encontra-se sobre a região central e leste do Amazonas. Ambas as parametrizações subestimaram embora BM, novamente, tenha representado melhor essa evolução com a condição inicial de D-1 conforme a figura 6.18(b).

Em D observa-se a precipitação ao norte do Amazonas em torno de 13 mm. o modelo subestimou esses valores tanto com BM como Kfm. Quanto a localização espacial, BM foi ligeiramente melhor com a condição inicial de D-2 conforme figura 6.17(c).

No dia D+1, as figuras 6.16(d) e 6.18(d), a parametrização Kfm mostrou uma melhor localização espacial da precipitação, ocorrida ao leste do Amazonas com as condições iniciais de D-3 e D-1.

Dessa forma, tem-se que o modelo regional Eta conseguiu representar o ciclo diurno das variáveis temperatura, pressão e umidade relativa, sendo que as parametrizações BM e Kfm alternaram-se entre subestimativas e superestimativas. Todavia, a precipitação foi mais bem simulada através de BM quanto a localização espacial, e em relação a quantidade de chuva os parâmetros ora subestimaram e ora superestimaram os valores médio sobre a área.

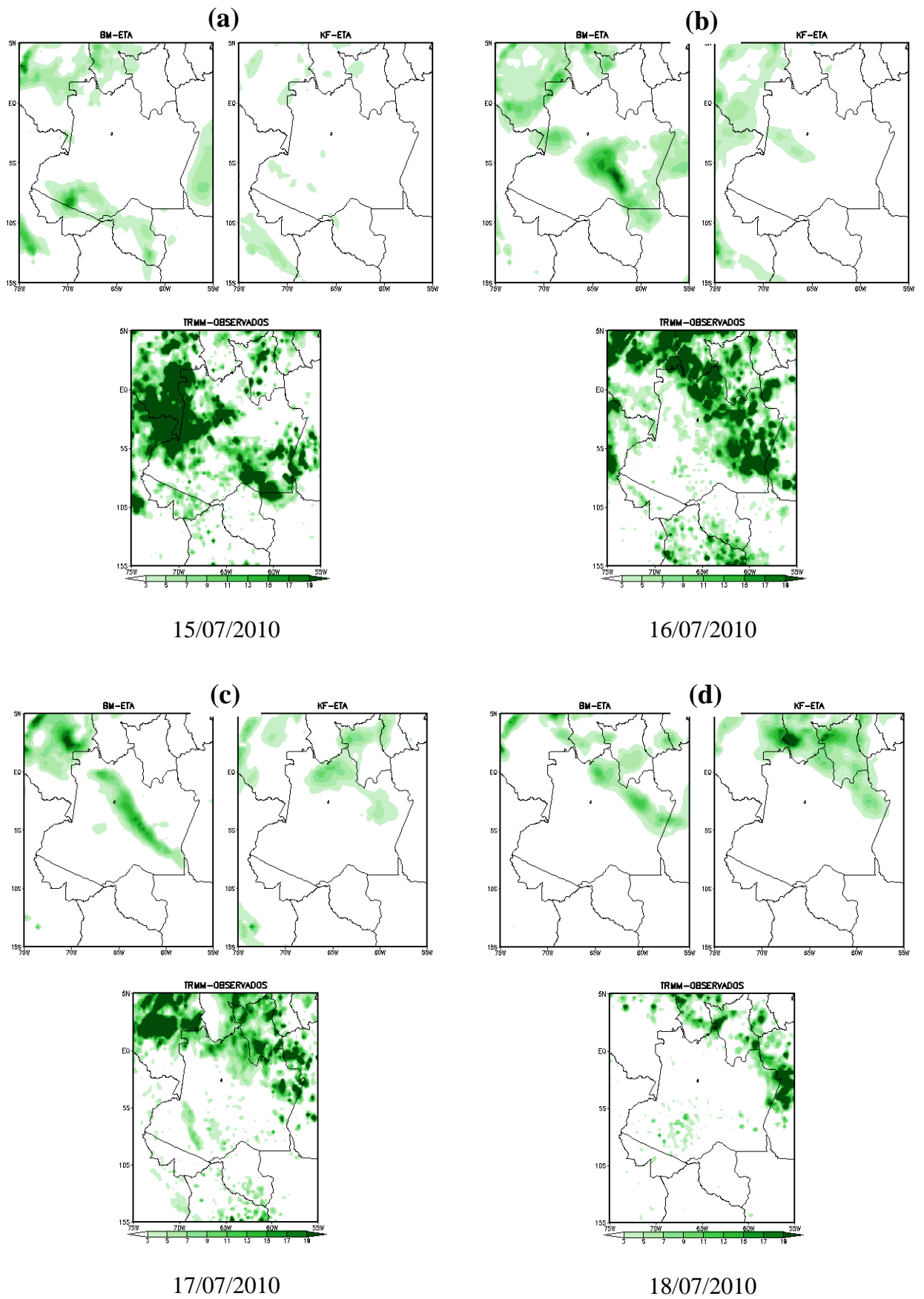


Figura 6.16: Como na figura 6.15, exceto com as Condições Iniciais do dia D-3.

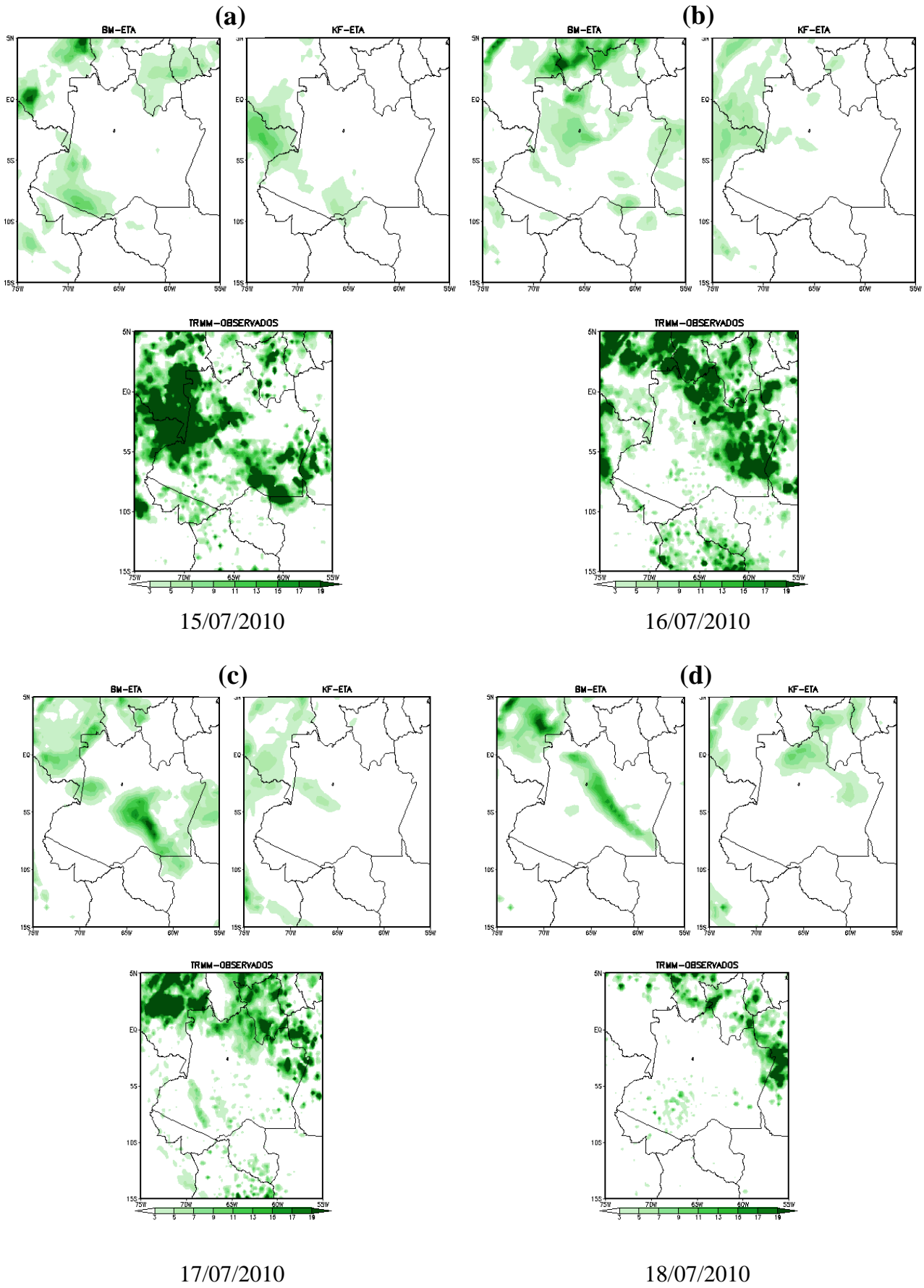


Figura 6.17: Como na figura 6.15, exceto com as Condições Iniciais do dia D-2.

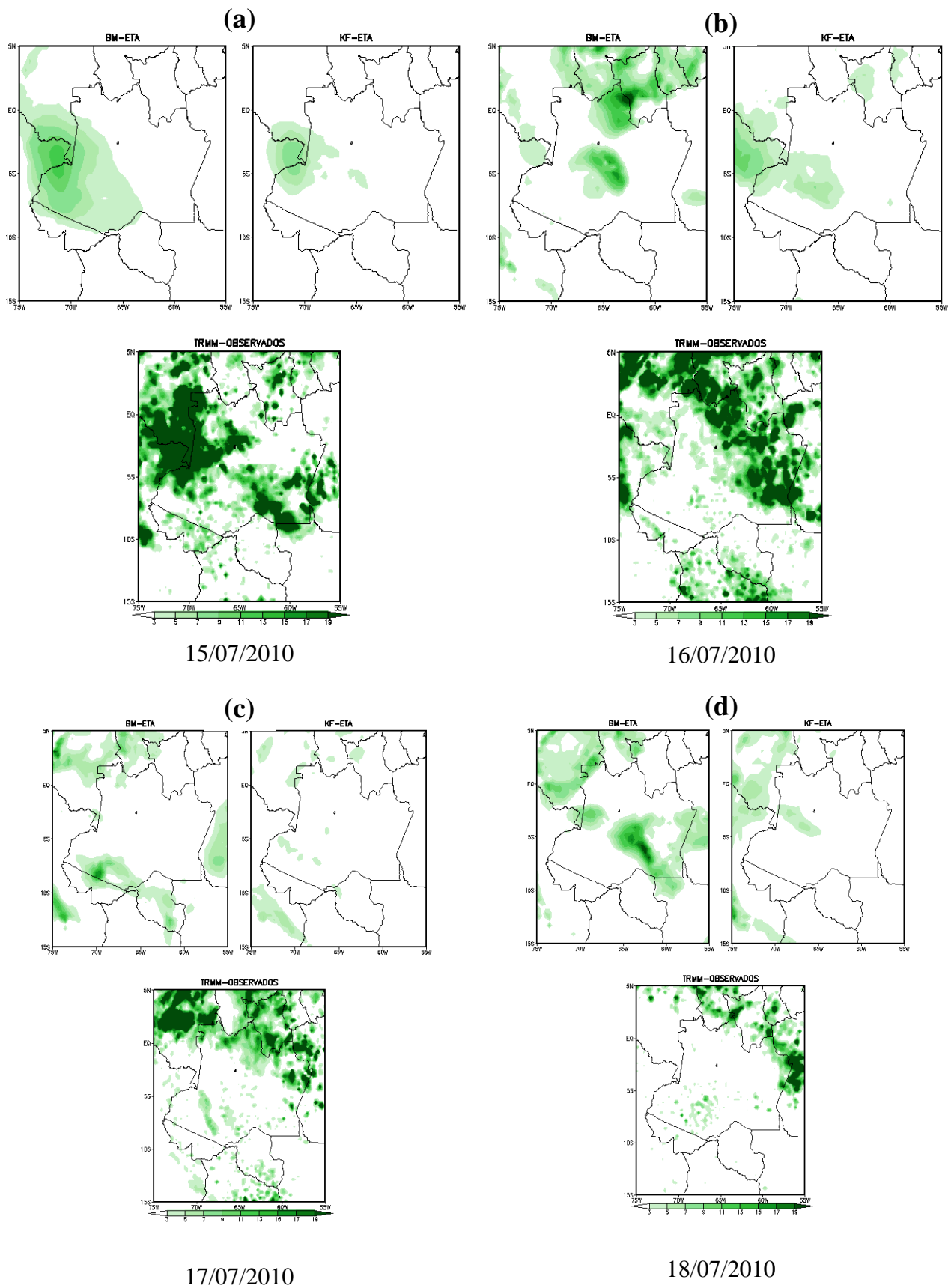


Figura 6.18: Análoga a figura 6.15, exceto com as Condições Iniciais do dia D-1.

A partir das simulações e observações construiu-se a tabela 6.1 onde estão apresentados percentuais de subestimação/superestimação do modelo na simulação da precipitação.

Tabela 6.1: Precipitação Média e diária entre os dias 15 e 18/07/2010 durante a passagem de um evento de frente fria que atingiu a Amazônia mostrando os resultados apresentados pelo Modelo Regional Eta, resolução 40 Km e parametrizados por BM e Kfm.

Precipitação – média/Área					
Eta- BM	Eta-KF	TRMM	% - BM	% - KF	
5,45	5,58	5,24	4,01	6,49	
Un: mm/dia					
	Dia 15/07_12	Dia 16/07_12	Dia 17/07_12	Dia 18/07_12	
Eta- BM	7,2	6,6	4,2	3,9	
Eta- KF	5,0	5,2	5,1	7,1	
TRMM	7,7	7,2	4,5	1,6	
% - BM	-6,49	-8,33	-6,67	143,75	
% - KF	-35,06	-27,78	13,33	343,75	
	Dia 15/07_13	Dia 16/07_13	Dia 17/07_13	Dia 18/07_13	
Eta- BM	6,4	8,4	5,5	4,1	
Eta- KF	4,9	5,0	4,9	5,8	
TRMM	7,7	7,2	4,5	1,6	
% - BM	-16,88	16,67	22,22	156,25	
% - KF	-36,36	-30,56	8,89	262,50	
	Dia 15/07_14	Dia 16/07_14	Dia 17/07_14	Dia 18/07_14	
Eta- BM	6,5	8,9	8,4	5,5	
Eta- KF	5,6	5,5	5,0	4,9	
TRMM	7,7	7,2	4,5	1,6	
% - BM	-15,58	23,61	86,67	243,75	
% - KF	-27,27	-23,61	11,11	206,25	
	Dia 15/07_15	Dia 16/07_15	Dia 17/07_15	Dia 18/07_15	
Eta- BM	3,2	8,9	6,4	8,4	
Eta- KF	2,0	5,9	4,9	5,0	
TRMM	7,7	7,2	4,5	1,6	
% - BM	-58,44	23,61	42,22	425,00	
% - KF	-74,03	-18,06	8,89	212,50	

Os resultados obtidos na tabela 6.1 apresentam a precipitação média diária para o período compreendido entre 15 a 18 de julho de 2010 e também a média para o mesmo período sobre a região de estudo (fig. 3.1). Os percentuais indicando a estimativa do modelo também foi calculada para cada rodada do modelo. As conclusões obtidas, quanto a média de precipitação sobre a área estudada, a partir do estudo observacional da precipitação através do dados do TRMM e das simulações do Modelo regional Eta foram as seguintes:

- a) Usando as condições iniciais do dia D-4 para os dias 16 e 17, tanto BM como KFm subestimaram a precipitação no dia da chegada do evento (16/07); No dia 17, BM subestimou e KFm superestimou as previsões. Nos dois dias BM apresentou uma melhor previsão espacial do evento.
- b) Com as condições iniciais do dia D-3, para o mesmo período, BM superestimou nos dois dias, apresentando uma melhor previsibilidade para o dia 16, enquanto KFm subestimou no dia 16 e superestimou no dia 17, mostrando uma melhor previsão para este dia.
- c) Analisando-se as observações e previsões com as condições iniciais do dia D-2 tivemos um padrão semelhante ao dia anterior, sendo que KFm apresentou uma melhor previsibilidade para o dia 17.
- d) Usando as condições iniciais do dia D-1, BM superestimou nos dois dias e KFm subestimou no dia 16 e superestimou no dia 17, sendo que KFm apresentou melhor previsibilidade para os dois dias.

Observa-se que ambas as parametrizações, (BM e KFm), se alternam entre subestimas e superestimativas e, dessa forma, não há uma melhor configuração em todas as simulações.

CAPÍTULO 7

7.1. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A partir das análises apresentadas sobre o estudo observacional e experimental, pode-se tirar as seguintes conclusões sobre a estrutura e a evolução das incursões dos sistemas frontais frio na Bacia Amazônica.

1. Na região amazônica, em particular, a oeste da bacia Amazônica chegam em média, cerca de cinco frentes frias por ano, e dessas, aproximadamente três alcançam o equador.
2. As frentes frias que afetam a bacia apresentam precipitação intensa (de cerca de 30 mm dia⁻¹) e uma queda de temperatura máxima diária de cerca de 8°C em 48 horas nas regiões sul e central da Amazônia.
3. Em uma situação de sistema frontal frio na Amazônia, o transporte de umidade ao sul da bacia é reduzido ou ausente, aumentando assim a convergência de fluxo de umidade sobre a bacia.
4. Durante o verão austral, as frentes frias atingem Manaus dois dias após afetarem São Paulo.
5. Os efeitos em Manaus, em termos de queda de temperatura, são mais fortes do que em Brasília, o que indica que a massa de ar frio se propaga em direção ao norte, a leste dos Andes e a oeste de Brasília sobre a Bolívia e Mato Grosso para chegar à Bacia Amazônica.
6. Nos casos de inverno austral as incursões de ar frio produzem 20% a mais de convecção e precipitação sobre a bacia do que nos casos de verão austral.

7. Um centro de alta pressão frio sobre a Argentina e um cavado profundo a leste se propaga cerca de 13° de longitude para leste de D-1 a D +1 da ocorrência do evento.
8. Um cavado secundário se forma sobre a região central da América do Sul e os ventos de sul a oeste deste cavado advectam ar frio para oeste da Bacia Amazônica.
9. A inclinação do centro do ciclone extratropical associada a frente fria é de aproximadamente 12° de longitude para oeste entre os níveis de 925 hPa e 200 hPa.
10. O campo de deformação que predomina durante o evento de frente fria (estudo de caso) apresenta o seu eixo de contração orientado de NW-SE durante o evento e a mesma orienta-se ao longo desse eixo.
11. O Gradiente Térmico orienta-se no sentido nordeste e observam-se fortes gradientes em D-1 e D sobre a Amazônia.
12. Valores negativos de Advecção de temperatura, indica predominância de ventos sul advectando ar frio para a região.
13. A partir da função frontogênica de Petterssen, pode-se observar a frontogênese sobre a Amazônia desde o dia D-2 até D, e frontólise em D+1.

Quanto a análise experimental com o modelo regional Eta verificou-se os seguintes resultados:

14. Para o episódio de Frente Fria estudado, ambas as parametrizações, BM e KFm, superestimaram a temperatura em 1 a 2°C , embora KFm tenha apresentado melhores resultados. Todavia, a variabilidade térmica diurna é apresentada satisfatoriamente.
15. Com relação a evolução temporal e geográfica da precipitação não houve uma parametrização que fosse melhor em todas as simulações. Embora as previsões com

2 a 1 dia de antecedência foram melhores, BM apresenta uma melhor localização temporal e espacial da precipitação.

16. Embora o modelo tenha representado satisfatoriamente o ciclo diurno, a variabilidade da umidade relativa simulada pelo modelo foi a que apresentou o pior desempenho. BM e KFm apresentaram erros que subestimam a umidade em até 20%.

17. A evolução da Pressão apresentou bons resultados simulados, tanto em BM quanto KFm, com erros médios quadráticos da ordem de 0,5 a 1 hPa. Acredita-se ser pelo fato da mesma sofrer pouca variação nas regiões equatoriais.

18. As simulações realizadas pelo modelo regional Eta conseguiu reproduzir satisfatoriamente a variabilidade diurna em todas as variáveis atmosférica, apresentando uma relação coerente durante a passagem de um sistema frontal. Coerências essas observadas na diminuição da temperatura, umidade mais baixa, um aumento e posterior queda da pressão e ocorrência de chuva nos dias 16 e 17, momento da chegada da FF na região.

América do Sul, especialmente na região leste da Cordilheira dos Andes, é uma região de intensa interação entre os trópicos e extratropicais, onde as massas de ar frio penetram no sentido meridional para a Bacia Amazônica. Normalmente, um jato de baixo nível flui da Bacia Amazônica para regiões central e sul do continente fornecendo umidade para o desenvolvimento da convecção ao sul de 20°S (Arraut e Satyamurty, 2009). Isto é, nesta região do globo, as transferências de calor sensível e latente entre as latitudes baixas e altas são intensas.

Krishnamurty et al. (1996) propôs um mecanismo de amplificação da jusante para os sistemas frontais intensos nas proximidades da América do Sul. As regiões centrais da América do Sul e sudeste do Brasil são favorecidas por frontogênese devido ao campo de deformação nos

ventos (Satyamurty e Mattos, 1991), ou seja, quando as condições são adequadas, as perturbações extratropicais se propagam na América do Sul com frequência amplificada e associada a frente são intensificadas e se movimentam para norte e nordeste, ocasionalmente afetando a Bacia Amazônica. A formação de um centro de baixa pressão secundário sobre o continente em regiões subtropicais parece ser crucial para o frio chegar à Bacia Amazônica.

Sabe-se que o transporte do vapor de água e sua convergência sobre a bacia amazônica influencia a precipitação sobre a região. As variações de precipitação tem importantes efeitos sobre a floresta amazônica. Uma grande parte da precipitação regional sobre a Amazônia se deve a convergência de umidade transportada de oceano Atlântico. Estudos que buscam investigar as diferenças deste aspecto durante um ano seco, como o de 2005 (Marengo et al., 2008) e anos chuvosos como 2009 e mais recentemente 2012 (Satyamurty et al. 2013), são importante para a compreensão das razões físicas da variabilidade interanual.

Resultados obtidos por Ricarti (2012) na análise dos campos de temperatura onde se verifica uma anomalia negativa nos dias D-1 e D, e positiva a partir de D+1 bem como a mudança na componente meridional do vento em até 48 horas antes da chegada da frente fria assemelham-se aos resultados obtidos neste estudo.

Satyamurty e Mattos (1989) identificaram a região centro sul do continente como sendo altamente frontogenética e a região equatorial frontolítica. Observou ainda que uma linha orientada no sentido NW-SE separa regiões frontogenéticas e frontolíticas, observações estas que concordam com a presente análise, para a região amazônica.

Oliveira (1986) estabeleceu uma climatologia de sistemas frontais associados a mecanismos que causam convecção na América do Sul e verificou que a maior frequência de passagem de sistemas frontais ocorre entre maio a dezembro. Todavia, observa-se na região amazônica, no presente estudo, um período mais estreito, entre maio e setembro.

Marengo et al. (1997) estudou as friagens ocorridas na Amazônia em 1994 e verificou que os mesmos duram em média 5 a 6 dias dos quais 2 a 3 apresentam temperaturas mais baixas e que a passagem desses eventos pode ser identificada através da variação da pressão atmosférica e umidade relativa. Em nosso estudo utilizamos em nossas análises observacionais e experimentais, entre outras, a umidade relativa.

O objetivo de nosso estudo foi contribuir para o entendimento das frentes frias, acrescentando aos trabalhos anteriores, o conhecimento da variabilidade das variáveis atmosféricas temperatura, vento, umidade e outras, haja vista a escassez de estudos que investiguem essa temática na região amazônica. Acredita-se, dessa maneira, ter contribuído através das análises observacionais feitas e do estudo de modelagem numérica de tempo para a região, que são pouco investigadas. Dessa forma, pretende-se continuar a pesquisar sobre esses sistemas sinóticos que atuam na região e pouco são explorados.

Futuramente, pretende-se dar continuidade às simulações com outros episódios de friagem que atingiram a região amazônica para que se possa avaliar qual (se possível) das parametrizações convectivas melhor representa esses fenômenos sinóticos e também aumentar o período de estudo, mantendo os mesmos critérios, e incluir para todos os casos um diagnóstico para a frontogênese (frontólise).

REFERÊNCIAS

- 1) ANDRADE KM. 2005. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2005. 187f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE-14056-TDI/1067.
- 2) Angeline IM. 2002. Sources of Rainwater in the Amazon. Ph.D. Dissertation, University of Virginia.
- 3) Angeline IM et al. 2010: Coupling between vegetation and the atmosphere. *Theor. Appl. Climatol.* DOI 10.1007/s00704-010-0377-5.
- 4) Arraut JM, Satyamurty P. 2009. Precipitation and water vapor transport in the southern hemisphere with emphasis on the South American region. *Journal of Climate* **48**: 1902-1912.
- 5) Betts A.K., Miller M.J., 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column test using GATE wave, BOMEX and arctic air-masses data sets *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 1306-1335.
- 6) Black TL. 1994: The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Mon. Wea. Rev.* n. 09, p. 265-278.
- 7) Bonatti JP., 1996: Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC. *Climanálise Especial*, 5 pp.
- 8) Bluestein HB. 1993. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and Theory of Weather Systems*. Oxford University Press. 608 pp.

- 9) Bustamante JF et al. 2005. Uma avaliação da previsibilidade de tempo do modelo ETA para a América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 1, p. 59-70.
- 10) Cavalcanti IFA. 1985. Casos de Intensa precipitação nas regiões sul e sudeste do Brasil no período de inverno de 1979-1983. INPE-3743 RPE/498.
- 11) Cavalcanti et al. 2009. Tempo e Clima no Brasil. Oficina de Textos.
- 12) Cavalcanti IFA, Kousky VE. 2003. Climatology of South American cold fronts. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 7. New Zealand: *American Meteorological Society*.
- 13) Chou SC, Silva JMGA. 1999. Objective Evaluation of Eta Precipitation Forecasts over South America. *Climanálise*, Cachoeira Paulista, SP, vol. 14, n. 01, pag.1-17.
- 14) Chou SC, Nunes AMB., Cavalcanti IFA. 2000: Extended range forecasts over South America using the regional Eta Model. *J. Geophys. Res.*, 105, 10.147-10.160.
- 15) Chou SC et al. 2007. Refinamento Estatístico das Previsões horárias de Temperatura a 2 m do Modelo Eta em Estações do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*. Vol. 22, n. 03, p.287-296.
- 16) Cohen JCP, Silva Dias MAF, Nobre CA. 1995. Environmental Conditions Associated with Amazonian Squall Lines: A Case Study. *Monthly Weather Review* **123**: 3163–3174.
- 17) Fels SB, Schwarzkopf MD. 1975: The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. *J. Atmos. Sci.*, vol. 32, p. 1475-1488.
- 18) Figueroa SN, Nobre CA. 1990. Precipitation distribution over central and western Tropical South America. *Climanálise* Vol. **5**, No. 6: 36-45.

- 19) Figueroa SN, Satyamurty P, Silva Dias PL. 1995. Simulation of the summer circulation over the South America Region with an Eta coordinate model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **52**: 1573-1584.
- 20) Fisch G. et al. Clima da Amazônia, 1996. Climanálise Especial – Edição comemorativa de 10 anos. Vol. 11, n. 10, p. 24-41.
- 21) Fortune M, Kousky VE. 1983. Two severe freezes in Brazil: Precursors and synoptic evolution. *Monthly Weather Review* **111**: 181-196.
- 22) Greco S. et al. 1990. Rainfall and Surface Kinematic Conditions Over Central Amazonia During ABLE 2B. *Journal of Geophysical Research* **95**:17001-17014.
- 23) Janjic ZI. The Step-mountain Eta coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *J. Atmos. Sci.* **122**: 927-945.
- 24) Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802.
- 25) Kalnay et al. NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. 1996. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, p. 437-471.
- 26) Kodama Y., Large scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ and the SACZ). Part I: characteristics of subtropical frontal zone. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **70**, 813-836
- 27) Kousky VE, Kayano MT. 1981. A climatological study of the tropospheric circulation over the Amazon region. *Acta Amazônica*, **11**: 743-758.

- 28) Krishnamurti TN, Tewari M, Chakraborty DR, Marengo J, Silva Dias PL, Satyamurty P. 1999. Downstream amplification: A possible precursor to major freeze events over southeastern Brazil. *Monthly Weather Review* **14**: 242–270.
- 29) Lacis AA, Hansen JE. 1974: A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, n. 31, p.118-133.
- 30) Lemos CF, Calbete NO. 1998. Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. *Climanálise Especial – Edição Comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC.*
- 31) Lima KC et al. 2010. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 101, n. 1-2, p. 121-135.
- 32) Marengo JA, Cornejo AG, Satyamurty P, Nobre CA, Sea W. 1997. Cold surges in tropical and extratropical South America: Three strong events in 1994. *Monthly Weather Review* **125**: 2759-2786.
- 33) Marengo JA., 1995: Interannual variability of deep convection in the tropical South America sector as deduced from ISCCP C2 data. *Int. J. Climatol.* 15, 995-1010.
- 34) Marengo JA et al. Sea W. 1997. Climatic Impacts of “Friagens” in Forested and Deforested Areas of the Amazon Basin. *Journal of Applied Meteorology.* 36, 1553-1566.
- 35) Marengo JA, Soares W. 2003. *Clima e Recursos Hídricos 9. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA. Porto Alegre, Brasil.*
- 36) Mellor GL, YAMADA T., 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.* 31:1791-1806.

- 37) Mesinger FZI. et al. 1988: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1518.
- 38) Mesinger FZI. et al. 2012: An upgraded version of the Eta model. *Meteorol Atmos Phys.* DOI 10.1007/s00703-012-0182-z.
- 39) Oliveira AS. 1986. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE-4008-TDL/239, 134 p.
- 40) Palmén E, Newton CW. 1969. *Atmospheric Circulation Systems. Their Structure and Physical Interpretation.* International Geophysics Series, Volume 13. Academic Press, New York and London. 603 pp.
- 41) Pezza AB, Ambrizzi T. 2005. Cyclone and Anticyclone tracks and large scale circulation associated with polar outbreaks in South America: Synoptic Climatology. *International Journal of Climatology*, Inglaterra, v. 25, n. 1, p. 215-241.
- 42) Quadro MFL et al. 1996. Climatologia de Precipitação e Temperatura. Climanálise Especial – Edição Comemorativa de 10 anos, MCT/INPE/CPTEC.
- 43) Rao VB, Cavalcanti IAF, Hada K. 1996. Annual Variation of Rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. *Journal of Geophysical Research* **101**: D21, 26539-26551.
- 44) Rocha EJP. 2005. Balanço de Umidade e Influência de Condições de Contorno Superficiais sobre a Precipitação da Amazônia. Tese de Doutorado.
- 45) Rozante JR. 2008. Experimentos com o modelo ETA em diferentes configurações durante o período SALLJEX e mecanismos de mesoescalas associados ao desenvolvimento de SCM. Tese de Doutorado.

- 46) Ricarte RMD. 2012. Climatologia dos eventos de Friagem no Sul da região Amazônica. Tese de Doutorado. INPE, São José dos Campos, Brasil.
- 47) Salati E, Marques J. 1984. Climatology of the Amazon region. In *The Amazon - Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Sioli, H. (ed.). Dr. W. Junk Publishers, 763 p.
- 48) Satyamurty P, Santos RP, Lemes MAM. 1980. On the stationary trough generated by the Andes. *Monthly Weather Review* **108**: 510-519.
- 49) Satyamurty P, Mattos LF. 1989. Climatological lower-tropospheric frontogenesis in the mid-latitudes due to horizontal deformation and divergence. *Monthly Weather Review* **117**: 1355-1364.
- 50) Satyamurty P, Nobre CA, Silva Dias PL. 1998. South America. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*. Eds. Karoly DJ and Vicent DG. American Meteorological Society, Meteorological Monographs, **27**, n. 49: 119-139.
- 51) Satyamurty P et al. 2013. A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin. DOI: 10.1002/grl.50245.
- 52) Seluchi M et al. 1998. The impact of the Andes on transient atmospheric systems: a comparison between observations and GCM results. *Mon. Wea. Rev.*, n. 126: 895-912.
- 53) Tanajura CAS et al. 2003. A influência do domínio e da resolução na simulação do modelo ETA da passagem de uma frente fria sobre o sudeste brasileiro. *Rev. Bras. Meteor.*, v. 18, n.1, p. 33-42.
- 54) Wagner, F. 2005. Modelagem do Impacto de Modificações da Cobertura Vegetal Amazônica no Clima Regional. Tese de Doutorado.

APÊNDICE