

GERAÇÃO DE INFORMAÇÕES PARA SUBSIDIAR ESTUDOS EM PLANEJAMENTO DE INVESTIMENTOS PARA INFRAESTRUTURAS A PARTIR DOS DADOS DE PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Relatório 6/8 - Relatório contendo os Índices de Instabilidade Atmosférica (IIA) calculados a partir das reanálises, identificando os valores típicos e ajustando os limiares dos eventos de tempestades severas ocasionados por passagens de Frentes Frias (FF) e sistemas Pré-Frontais (PF)

Priscila Tavares

Elaborado por: Priscila da Silva Tavares - priscilatavares@gmail.com

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

EQUIPE TÉCNICA - MMA

Hugo do Valle Mendes (coordenação)
Adriana Brito da Silva
Jaqueline Leal Madruça

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

Ana Carolina Câmara (coordenação)
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas
Pablo Borges de Amorim

EQUIPE TÉCNICA - DEFESA CIVIL/ SANTA CATARINA

Flavio Rene Brea Victoria
Frederico Moraes Rudorff

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Chou Sin Chan

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP
70068-901
Telefone: + 55
61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

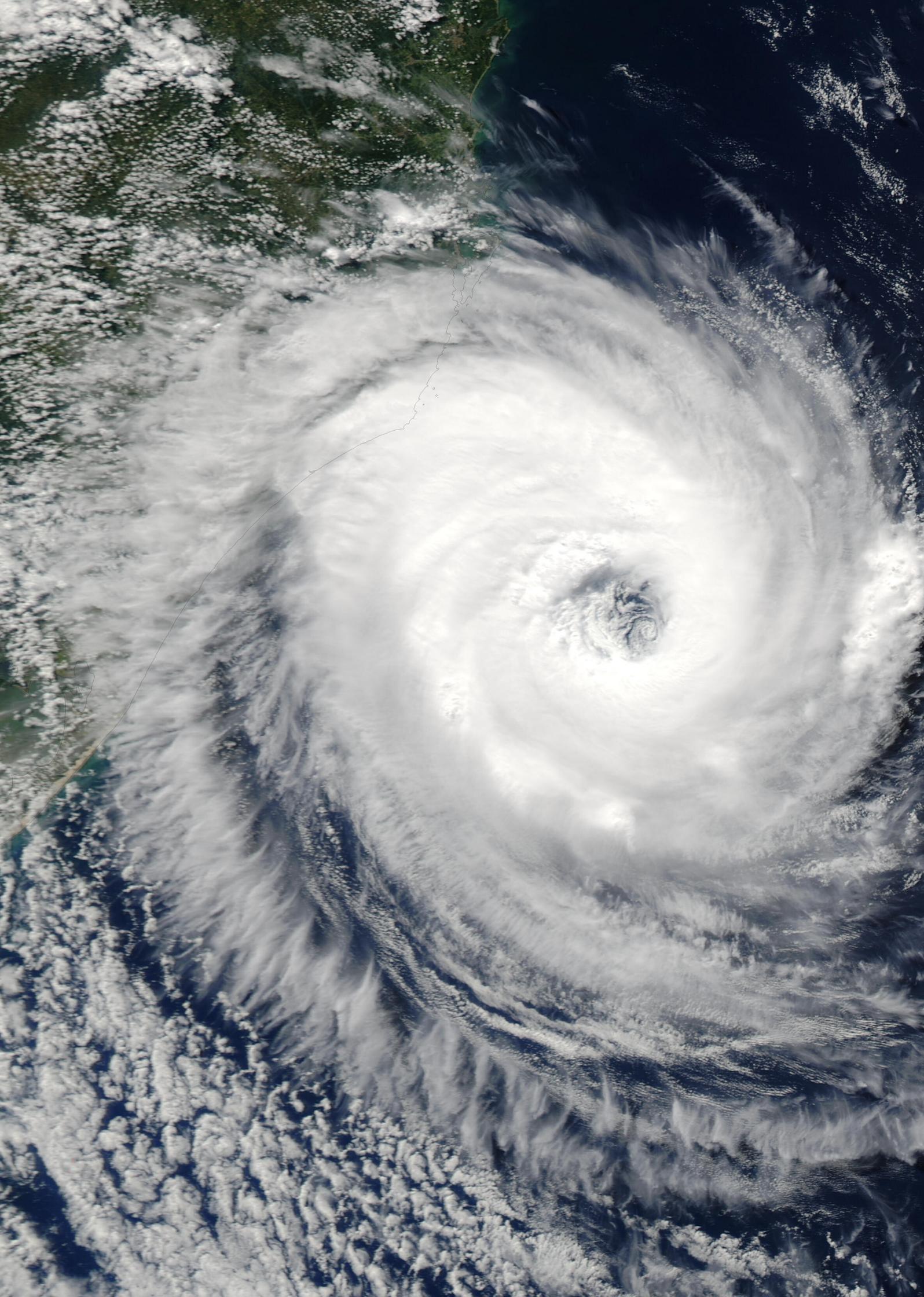
A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha

BMU Bonn:
Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara
T +55 61 9 99 89 71 71
T +55 61 2101 2098
E ana-carolina.camara@giz.de



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS _____	iv
LISTA DE TABELAS _____	vi
1. CONTEXTO _____	7
1.1 <i>Objetivo</i> _____	8
2. DADOS E METODOLOGIA _____	9
2.1 <i>Área de estudo</i> _____	9
2.2 <i>Casos selecionados</i> _____	10
2.3 <i>Índices de Instabilidade Atmosférica</i> _____	11
2.3.1 <i>Convective Available Potential Energy (CAPE)</i> _____	11
2.3.2 <i>Lifted Index (LI)</i> _____	12
2.4 <i>Identificação de frentes frias</i> _____	12
3. RESULTADOS _____	15
3.1 <i>Análise dos casos selecionados</i> _____	15
3.2 <i>Climatologia de frentes frias intensas</i> _____	24
4. SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	28
5. PRÓXIMA ETAPA _____	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	30
APÊNDICE A: <i>Indicador de passagem de Frente Fria (FF)</i> _____	33
APÊNDICE B: <i>Índices de Instabilidade Atmosférica (IIA)</i> _____	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - a) Localização do Porto de Itajaí. b) Mapa topográfico do estado de Santa Catarina e regiões adjacentes. Dados de elevação digital do SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* disponibilizados na resolução horizontal de 30 m. Fonte: Produção da autora com base nos dados do SRTM. _____ 8

Figura 2.1 - Área selecionada para avaliar a incursão de Frentes Frias Intensas em Santa Catarina (a), com destaque para a localização das mesorregiões do Estado (b). Fonte: Produção da autora com base nos limites propostos por IBGE (2002). _____ 9

Figura 2.2 - Combinação das três condições usadas no critério para identificação das Frentes Frias (a), área onde as três condições ocorreram simultaneamente – identificador da passagem frontal (b) e imagem do satélite GOES-13 no canal infravermelho (DSA/INPE). Imagem de satélite, condições sobrepostas e identificador frontal referentes ao dia 24 de julho de 2014 as 0000 UTC - caso 8. No campo à direita (a), o sombreado corresponde a tendência de queda de temperatura em 24 horas maior ou igual a 2°C, as linhas contínuas correspondem a tendência de aumento de pressão ao nível médio do mar maior ou igual a 2 hPa e o pontilhado em azul corresponde o vento de sul maior ou igual a 2 m/s em 925 hPa. _____ 13

Figura 2.3 - Identificador de Frentes Frias para o evento de outubro de 2001, com base nas reanálises do ERA-Interim. Sequência 1 – considerando o horário sinótico apenas das 1200 UTC e Sequência 2 – considerando os horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. _____ 14

Figura 3.1 - Valores referentes ao percentil 95° (p95) e 99° (p99) da precipitação diária. Considerou-se dados de precipitação oriundas do produto MERGE/INPE (Rozante et al., 2010) _____ 15

Figura 3.2 - Precipitação diária antes, durante e após a passagem da Frente Fria (FF) para os 10 casos selecionados. Valor médio nas mesorregiões (Prec), valor máximo encontrado em cada mesorregião (Prec_max) e percentis médios (p95 - 95° e p99-99°.) A passagem da FF está marcada em sombreado rosa (continua). _____ 17

Figura 3.3 - Valores médios e máximos da umidade específica (g/kg) e CAPE (J/kg) e valores médios e mínimos do Lifted Index (°C) antes e durante a passagem das Frentes Frias no estado de Santa Catarina para os 10 casos selecionados para avaliação. Linhas amarelas traçadas nos limiares: a) 10,5 g/kg, b) 445 J/kg e c) 0°C (continua). _____ 21

Figura 3.4 - Valores referentes ao percentil 99° do valor do vento máximo diário (km/h). Considerou-se dados da velocidade do vento nos horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800Z das reanálises do ERA-Interim. _____ 23

Figura 3.5 - Indicador de Frentes Frias intensas associadas com ventos intensos a 10 m (percentil 99°). Evento ocorrido no mês de julho de 2014 (caso 8). _____ 23

Figura 3.6 - Indicador de Frentes Frias intensas, associadas com altos valores de chuva diária (percentil 95°), com potencial para causar danos ou interrupção das atividades do Porto de Itajaí-SC. _____24

Figura 3.7 - Número médio anual de frentes frias com base na climatologia de 1998 a 2010, obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, identificado em cada ponto de grade e no nível atmosférico de 925 hPa. Frente frias em geral a) e frentes frias associadas com chuvas intensas (percentil 95°) b) e vento intenso (percentil 99°) b) durante sua passagem. Para as frentes frias associadas a chuvas intensas foram usados, além das reanálises, dados do MERGE. ____25

Figura 3.8 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e ventos intensos (FF_p99_vv10m) com base na climatologia de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa. Valores médios para as mesorregiões de Santa Catarina, a saber: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí. ___26

Figura 3.9 - Número médio sazonal de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_var) e ventos intensos (FF_vv10m_p99) com base na climatologia de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa. Para as frentes frias associadas a chuvas intensas foram usados, além das reanálises, dados do MERGE. _____27

Figura 3.10 - Total mensal de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e ventos intensos (FF_p99_vv10m) com base na climatologia de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa. Valores médios para as mesorregiões de Santa Catarina, a saber: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí. ___28

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Eventos de chuvas intensas associadas a passagens de frentes frias e sistema pré-frontais listados pelos parceiros do Porto de Itajaí (*) e da EPAGRI-CIRAM (MMA-GIZ, 2018). _____ 10

Tabela 3.1 - Dia da passagem da Frente Fria (FF) em SC dos dez casos selecionados para avaliação, assim como os valores de umidade específica, velocidade do vento a 10 m (VV10m) e os índices de instabilidade CAPE e LI. São apresentados os dias e os valores que apresentaram mais intensos durante a ocorrência do evento. -1 dia – um dia antes da passagem da FF, 0 dia – dia da passagem da FF, + 1 dia – um dia após a passagem da FF e +2 dias – dois dias após a passagem da FF. _____ 20

1. CONTEXTO

A partir de reuniões entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e a Secretaria de Estado de Planejamento de Santa Catarina (SPC-SC), foi demonstrado o interesse dessa secretaria em engajar-se ao Projeto de Aprimoramento dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (*Enhancing Climate Services for Infrastructure Investments - CSI*). Foi considerado que a parceria poderá ajudá-los a atingir as metas institucionais no contexto da agenda de adaptação à mudança do clima. Uma oficina foi organizada em abril de 2018 para identificar as possíveis demandas de serviços climáticos dos setores portuário e de linhas de transmissão de Santa Catarina visando investimentos na infraestrutura e considerando as mudanças do clima. Ambos setores enviaram uma lista de eventos em que suas infraestruturas sofreram prejuízos e danos devido a extremos meteorológicos, tais como: rajadas de vento, chuvas intensas e tornados. Identificou-se, através de levantamentos da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI-CIRAM) – relatório produto 2 (MMA-GIZ, 2018), que grande parte dos danos causados - estruturais ou não - ao Porto de Itajaí por tempestades severas foram associadas as passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais. Estes eventos deflagraram, na região do Porto e proximidades, inundações, deslizamentos, aumento da correnteza do rio Itajaí-Açu, assoreamento, etc.

O Porto de Itajaí localiza-se no leste de SC (Figura 1.1a), mais precisamente na mesorregião Vale do Itajaí, que é considerada no Estado uma das mais expostas aos desastres naturais associados a eventos meteorológicos extremos (Escobar et al., 2016). Devido às características topográficas do Vale do Itajaí, tais como a presença de serras ao sul e a oeste, assim como pequenas elevações junto ao Oceano Atlântico, os ventos de quadrante leste, oriundos do mar, facilitam a convergência de umidade no interior do vale, intensificando assim os sistemas na região e provocando conseqüentemente a ocorrência de chuvas intensas (Figura 1.1b). Outro fator é a localização de SC entre as latitudes médias e subtropicais, o que permite a passagem frequente das frentes frias e sistemas pré-frontais, bem como a passagem das massas de ar tropical (Seluchi et al., 2017). Além disso, a presença dos jatos de altos e baixos níveis e a

proximidade do Oceano Atlântico, completam um quadro meteorológico propício para a ocorrência de tempestades severas na região (Escobar, 2009; Salio et al., 2007). Conforme Severo (1994), grande parte dos eventos de chuvas intensas na região do Vale do Itajaí são provocados pela passagem de sistemas frontais e, segundo relatado pelos parceiros do Porto de Itajaí os principais causadores de danos estruturais e econômicos ao porto.

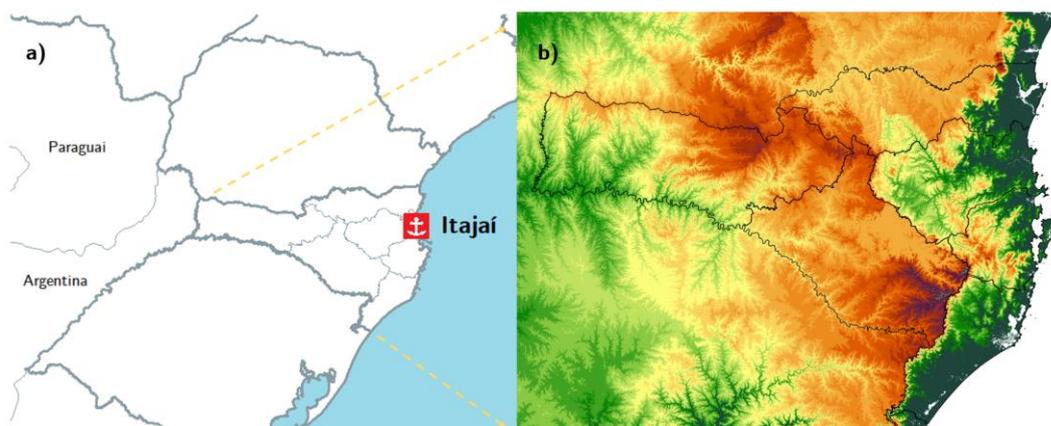


Figura 1.1 - a) Localização do Porto de Itajaí. b) Mapa topográfico do estado de Santa Catarina e regiões adjacentes. Dados de elevação digital do SRTM - Shuttle Radar Topography Mission disponibilizados na resolução horizontal de 30 m. Fonte: Produção da autora com base nos dados do SRTM.

Diante do exposto e com base no histórico de eventos de frentes frias intensas ocorridas na região, construiu-se uma metodologia de detecção de tempo severo associada a passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais, conforme descrita a seguir.

1.1 Objetivo

Cumprir o sexto produto do Projeto CSI – Ampliação dos Serviços Climáticos para investimentos de Infraestruturas (PN: 16.9025.4-003.00), termo de referência: Geração de informações, a partir dos dados de projeções de mudanças climáticas, para subsidiar estudos em planejamento de investimentos para infraestruturas. O produto consiste em um relatório contendo os Índices de Instabilidade Atmosférica (IIA) calculados a partir das reanálises, identificando os valores típicos e ajustando os limiares dos eventos de tempestades severas ocasionados por passagens de Frentes Frias (FF) e sistemas Pré-Frontais (PF).

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Com intuito de acompanhar o deslocamento da Frente Fria (FF) desde sua incursão no extremo sul do Brasil, a área delimitada para confecção dos campos espaciais compreendeu grande parte da América do Sul, conforme ilustrada na Figura 2.1a. Uma análise mais criteriosa das condições atmosféricas foi realizada para Santa Catarina, com foco nas mesorregiões do Estado, de acordo com os limites propostos por IBGE (2002) (Figura 2.1b). Santa Catarina está inserida na região sul do território brasileiro juntamente com estados do Paraná e Rio Grande do Sul, sendo o menor estado desta região com uma área de 95.346,18 km². O Estado possui 293 municípios, agrupados em seis mesorregiões, a saber: Oeste Catarinense, Norte Catarinense, Sul Catarinense, Serrana, Grande Florianópolis e Vale do Itajaí.

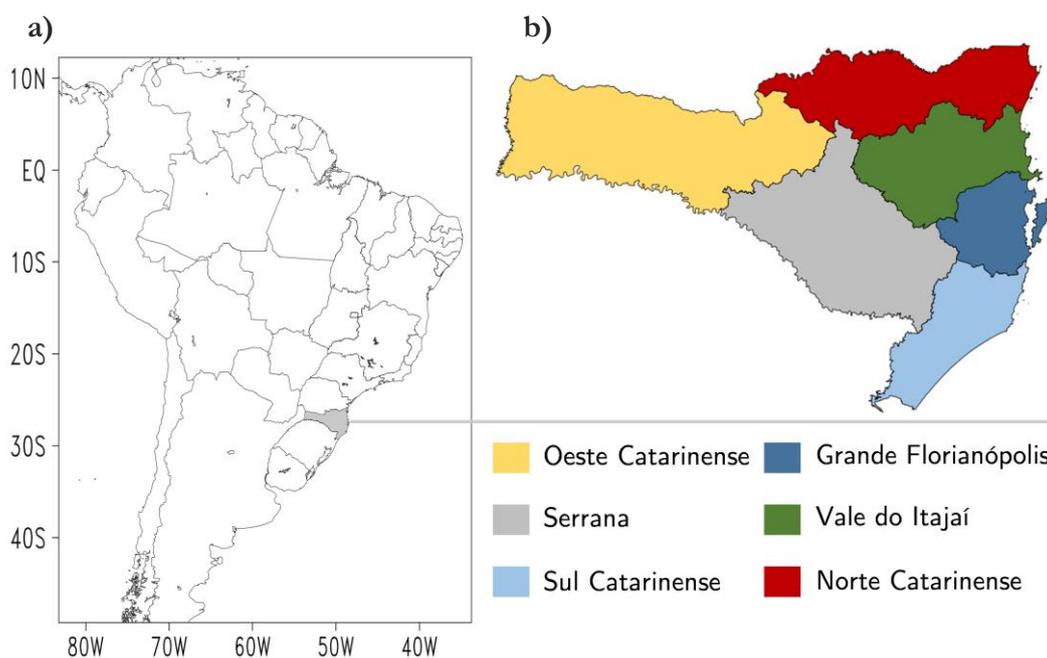


Figura 2.1 - Área selecionada para avaliar a incursão de Frentes Frias Intensas em Santa Catarina (a), com destaque para a localização das mesorregiões do Estado (b). Fonte: Produção da autora com base nos limites propostos por IBGE (2002).

2.2 Casos selecionados

A partir da listagem de eventos de tempo severo passados pelos parceiros do Porto de Itajaí e pela EPAGRI-CIRAM (MMA-GIZ, 2018) foram selecionados dez casos de eventos de chuvas intensas associadas a passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais, conforme dispostos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Eventos de chuvas intensas associadas a passagens de frentes frias e sistema pré-frontais listados pelos parceiros do Porto de Itajaí (*) e da EPAGRI-CIRAM (MMA-GIZ, 2018).

Nº caso	Evento	Data	Consequência	Informações
1*	1983	09 a 13/07	Enchente/Correnteza	Ruptura dos berços 3 e 4
2*	1984	06 a 10/08	Grande enchente	A enchente durou apenas alguns dias, porém o rio Itajaí-Açu atingiu um nível maior que no ano de 1983. No dia 7 foi registrada a marca de 15,46 m.
3*	2001	01 a 03/10	Pequena enchente	A frente fria causou chuvas intensas provocando enchentes e danos materiais em SC.
4	2010	21 a 23/04	Transbordamento Rio Itajaí-Açu	Altos acumulados de chuvas e registros de ventos fortes. Ruptura parcial do berço 1. As chuvas causaram inundações em várias cidades de SC e,
5*	2011	08 a 10/09	Enchente/Correnteza	segundo a defesa civil, mais de 50 municípios decretaram situação de emergência.
6*	2013	20 a 23/09	Enchente	Acumulados significativos de chuvas. transbordamento de rios e córregos, principalmente no Vale do Itajaí
7	2014	07 a 09/06	Enchente/assoreamento	Acumulados significativos de chuva no leste de SC. Perda de profundidade do Canal de Acesso. Investimento da União de cerca de R\$ 38 milhões para dragagem de restabelecimento de profundidade.
8	2014	23 a 27/07	Não relatada	Chuvas fortes e acumulados significativos
9	2015	13 a 15/06	Não relatada	Chuvas fortes e acumulados significativos
10	2015	25 e 26/09	Não relatada	Chuvas fortes e acumulados significativos

Procurou-se selecionar casos recentes devido à disponibilidade de dados para avaliação, todavia, eventos mais antigos, como os casos ocorridos em julho de 1983 e agosto de 1984, foram inseridos devido ao grande impacto econômico produzido. Em julho de 1983, as chuvas intensas contribuíram para que o rio Itajaí-Açu, inserido na bacia do Itajaí, atingisse uma cota máxima de 15,34 m, provocando catástrofe, como a ruptura dos berços de atracação 3 e 4 do Porto de Itajaí. Estima-se que, neste evento, os danos materiais em todo

estado de Santa Catarina foram superiores a 1 bilhão de dólares (Silva Dias, 2009). Um ano após, mais precisamente em agosto de 1984, as chuvas intensas produziram mais uma enchente de grande proporção. O evento durou alguns dias e o rio Itajaí-Açu atingiu uma cota máxima de 15,46 m, ou seja, superior ao ano de 1983. A enchente afetou grande parte do território catarinense e praticamente todo o Vale do Itajaí (Santos, 2010). Estima-se que 82 municípios foram assolados pelas enchentes, totalizando uma área de cerca de 36 mil quilômetros quadrados, ou seja, 38% do território catarinense, deixando mais de 255 mil desabrigados (Adami e Rosa, 2005; Santos, 2010).

2.3 Índices de Instabilidade Atmosférica

Os Índices de Instabilidade Atmosférica (IIA) foram usados para compor o indicador de tempo severo, por serem ferramentas que fornecem indicativo da intensidade da tempestade (Nascimento et al., 2005). Na estimativa dos IIA são considerados a formação de um ambiente propício a tempestades, tais como: a energia disponível para o sistema, o cisalhamento vertical do vento para sustentar a severidade da tempestade e os movimentos ascendentes do ar, que atuam como mecanismos de formação destas tempestades. Mais informações acerca dos IIA podem ser encontradas em Nascimento et al. (2005). Para estimativa IIA foram utilizadas as reanálises do ERA-Interim, obtidas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) na grade horizontal $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, para os horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. Devido as características dinâmicas dos eventos selecionados, o foco nas avaliações foi dado aos índices termodinâmicos CAPE e LI, conforme descritos a seguir:

2.3.1 Convective Available Potential Energy (CAPE)

A Energia Potencial Convectiva Disponível, o CAPE, é a medida da quantidade de energia disponível para a convecção (Bluestein, 1993) e é definido por:

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

onde NCE é o nível de convecção espontânea e NEL é o nível de equilíbrio ou nível de perda de empuxo para uma determinada parcela de ar ascendente. θ_v é a temperatura potencial virtual desta parcela de ar e $\bar{\theta}_v$ é a temperatura

potencial virtual do ambiente. Como este parâmetro compreende a camada em que a ascensão da parcela de ar é livre, CAPE é uma medida verticalmente integrada do trabalho realizado pelo ambiente sobre a parcela de ar ao acelerá-la para cima, dado em J/kg. Valores típicos de CAPE em dias de convecção moderada a intensa variam entre 1000 e 3000 J/kg (Bluestein, 1993).

2.3.2 Lifted Index (LI)

O índice de instabilidade por levantamento (LI) é definido por (Galway, 1956):

$$LI = T_{ar} - T_{parc}$$

onde T_{ar} é a temperatura do ar em 500 hPa e T_{parc} é a temperatura de uma parcela levantada adiabaticamente até o nível de 500 hPa (ambas expressas °C ou em K). Valores negativos de LI ($LI < 0^{\circ}C$) indicam condições instáveis, ou seja, a parcela de ar ascendente é flutuante em níveis médios. LI abaixo de $-5^{\circ}C$ indica situação muito instável, e extremamente instável se abaixo de $-10^{\circ}C$ (Nascimento, 2005).

2.4 Identificação de frentes frias

Na identificação das FF, assim como utilizados nas estimativas dos IIA, foram usados dados das reanálises do ERA-Interim com resolução horizontal de aproximadamente 75 km. O critério adotado para identificação da passagem de uma FF é o mesmo de Foss (2016) e Foss et al. (2017), o qual determina que a passagem acontece quando: 1 – há aumento na pressão ao nível médio do mar de, pelo menos, 2 hPa em um período de 24 horas; 2 - há queda da temperatura do ar em 925 hPa de pelo menos $2^{\circ}C$ em 24 horas; e 3 – ocorre vento de sul de, pelo menos, 2 m/s em 925 hPa. Estas condições devem ocorrer simultaneamente sobre uma caixa de grade e oito caixas de grade ao redor da caixa central, com intuito de excluir efeitos de pequenos deslocamentos. O critério adotado por Foss (2016) e Foss et al. (2017) assemelham-se aos usados por Andrade (2005), Cavalcanti e Kousky (2009), Escobar et al. (2016) e Seluchi et al. (2017).

A Figura 2.2 mostra a combinação das três condições do critério adotado para a identificação da FF, a área onde as condições ocorreram simultaneamente (identificador da passagem frontal) e a imagem de satélite referente ao horário da passagem frontal no dia 24 de julho de 2014 às 0000 UTC

(caso 8). Pelo critério, a FF é identificada ao norte da Argentina, grande parte do Paraguai e Uruguai e extremo sul da região Sul do Brasil, área onde as três condições ocorrem simultaneamente (Figura 2.2a, b). Na imagem de satélite, a faixa de nebulosidade associada a FF se encontra deslocada ligeiramente para leste e norte da região onde as três condições se sobrepõem (Figura 2.2c). Isto ocorre porque o ambiente sinótico capturado pelo método corresponde a uma situação pós-frontal, ou seja, admite-se que a FF passou sobre aquela caixa de grade horas antes de sua identificação (Foss et al., 2017; Foss, 2016).

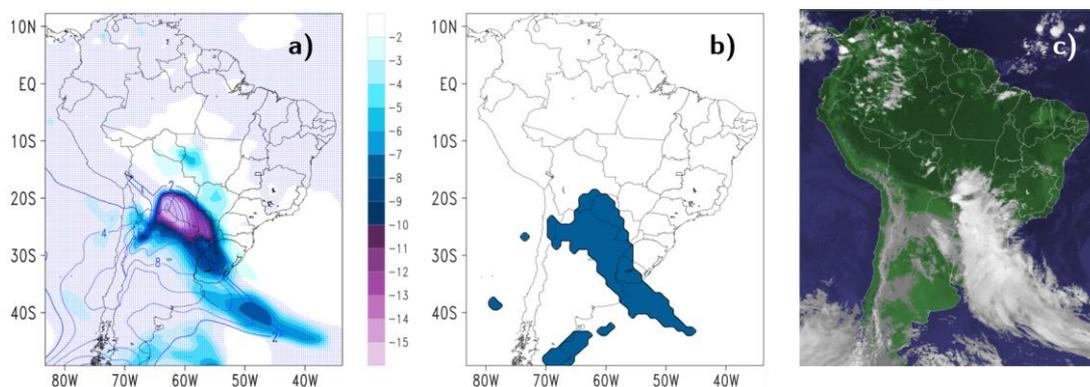


Figura 2.2 – Combinação das três condições usadas no critério para identificação das Frentes Frias (a), área onde as três condições ocorreram simultaneamente – identificador da passagem frontal (b) e imagem do satélite GOES-13 no canal infravermelho (DSA/INPE). Imagem de satélite, condições sobrepostas e identificador frontal referentes ao dia 24 de julho de 2014 as 0000 UTC - caso 8. No campo à direita (a), o sombreado corresponde a tendência de queda de temperatura em 24 horas maior ou igual a 2°C, as linhas contínuas correspondem a tendência de aumento de pressão ao nível médio do mar maior ou igual a 2 hPa e o pontilhado em azul corresponde o vento de sul maior ou igual a 2 m/s em 925 hPa.

Diferentemente do critério adotado por Foss (2016) e Foss et al. (2017) e, dos demais artigos encontrados na literatura (Andrade, 2005; Escobar et al., 2016; Seluchi et al., 2017, etc), os quais utilizaram apenas um horário sinótico (1200 UTC) ou valores médios diários, nesse trabalho foram utilizados os horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC para identificação das FF. Conforme ilustrado na Figura 2.3, verifica-se que a adoção de mais horários sinóticos contribui para capturar as FF que apresentam deslocamento mais rápido, tais como o caso ocorrido em outubro de 2001. Através da sequência 1 (Figura 2.3), é possível notar que utilizando apenas o horário das 1200 UTC não seria possível capturar a passagem da FF no estado de Santa Catarina. Após as modificações realizadas, o método foi aplicado nos dez casos selecionados e os resultados indicaram que a metodologia conseguiu capturar todos os eventos,

demonstrando assim que o método é eficaz na identificação da passagem das FF. Em seguida, foram realizadas análises dos ingredientes atmosféricos que propiciaram a formação de tempo severo, assim como avaliações dos acumulados de chuva em 24 horas e dos limiares dos índices CAPE e LI associados às passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais selecionados.

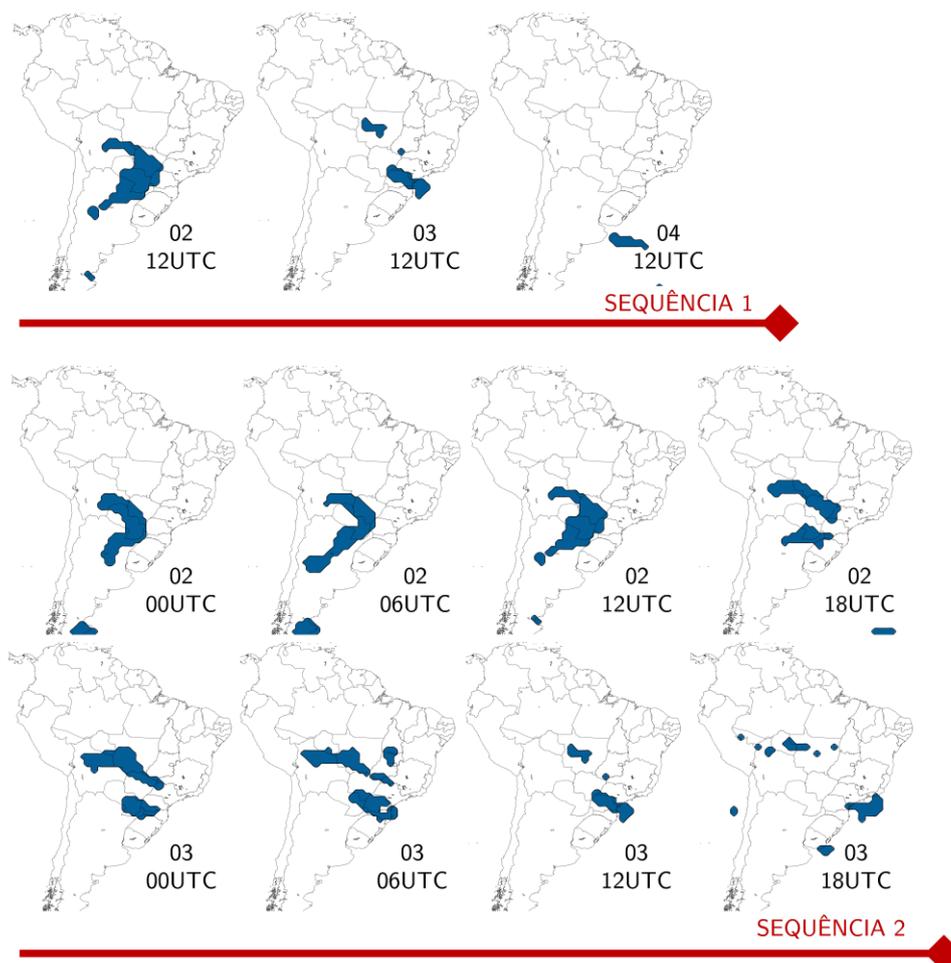


Figura 2.3 - Identificador de Frentes Frias para o evento de outubro de 2001, com base nas reanálises do ERA-Interim. Sequência 1 – considerando o horário sinótico apenas das 1200 UTC e Sequência 2 – considerando os horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC.

3. RESULTADOS

3.1 Análise dos casos selecionados

Inicialmente, realizou-se uma análise estatística, com base nos percentis associados a extremos de chuvas em Santa Catarina. Considerou-se os valores de chuva superiores ao percentil 95° (p95) e ao percentil 99° (p99), ou seja, o valor de chuva referente aos 5% e 1% de eventos mais intensos do total da série. Para tal, foram usados dados diários de precipitação para o período de 1998 a 2010 oriundos do produto MERGE/INPE na resolução horizontal de 0,25° x 0,25° (Rozante et al., 2010). O MERGE é resultado de uma combinação de dados pluviométricos observados e estimativa de precipitação derivada do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM).

Na Figura 3.1, são apresentados os valores dos percentis p95 e p99 de precipitação. Nota-se que os valores mais altos foram encontrados na parte oeste de Santa Catarina sendo de cerca de 55 mm e 90 mm para os percentis p95 e p99, respectivamente. A segunda mesorregião que apresentou extremos de chuvas mais altos é a Serrana com valores entre 48 e 81 mm. Nas demais mesorregiões, inclusive a mesorregião Vale do Itajaí, os valores médios referentes aos percentis p95 e p99 foram da ordem de 42-44 mm e 77-79 mm, respectivamente (Figura 3.1c).

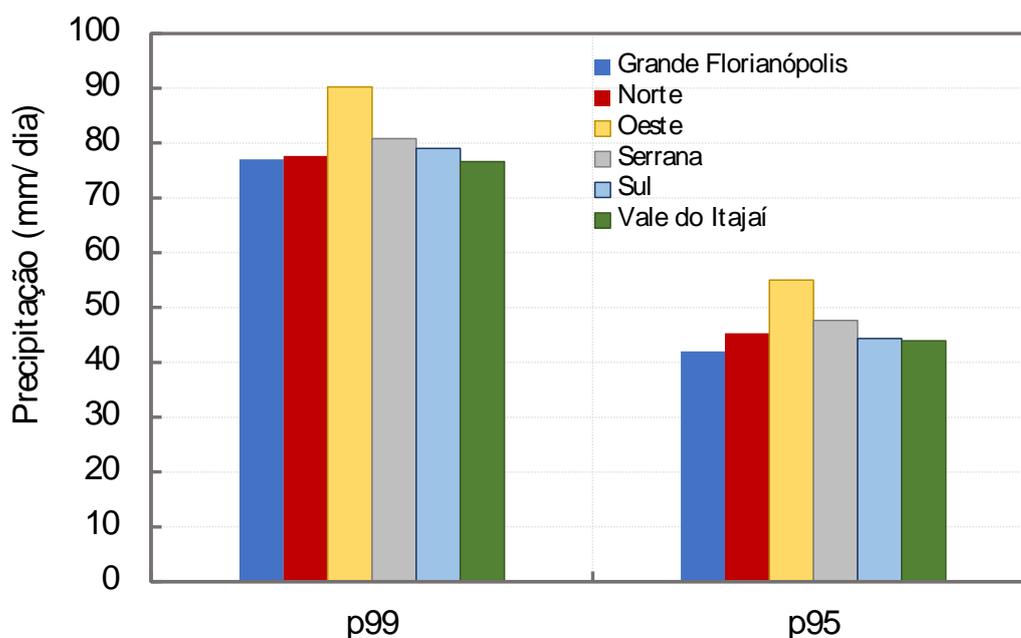


Figura 3.1 - Valores referentes ao percentil 95° (p95) e 99° (p99) da precipitação diária. Considerou-se dados de precipitação oriundas do produto MERGE/INPE (Rozante et al., 2010)

Após a análise estatística de chuvas extremas, foram verificadas as ocorrências de acumulados de chuva diária associados as passagens das FF, que excederam os percentis. Na Figura 3.2 são apresentados os totais de chuva diária, considerando os valores médios (Prec) os valores máximos (Prec_máx) registrados em cada mesorregião dos dez casos selecionados. Foram usados dados diários do MERGE, para os casos ocorridos a partir de 1998, e dados do conjunto disponibilizado por de Xavier et al. (2016). O conjunto de Xavier et al. (2016) é uma compilação de dados observados de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), construído com análises de consistência e preenchimentos de falhas. O domínio deste conjunto cobre todo Brasil na grade regular de 25 km X 25 km, em escala temporal diária para o período 1980 a 2013

Verificou-se que, baseado na análise estatística de extremos de chuvas em SC, todos os casos selecionados estiveram associados em grande parte das mesorregiões a chuvas acumuladas em 24 horas equivalentes ao percentil 95º, antes, durante ou após a passagem da FF. Em alguns casos as chuvas diárias extrapolaram o valor do percentil 99º, como ocorridos nos casos 1, 3 e 10. Foi possível notar também que as chuvas intensas podem ocorrer até 48 horas antes ou até 48 horas após a passagem da FF. Em alguns casos, como os eventos ocorridos em julho de 1983 (caso 1) e setembro de 2011 (caso 5) as chuvas intensas aconteceram até mais de 72 horas após a passagem da FF.

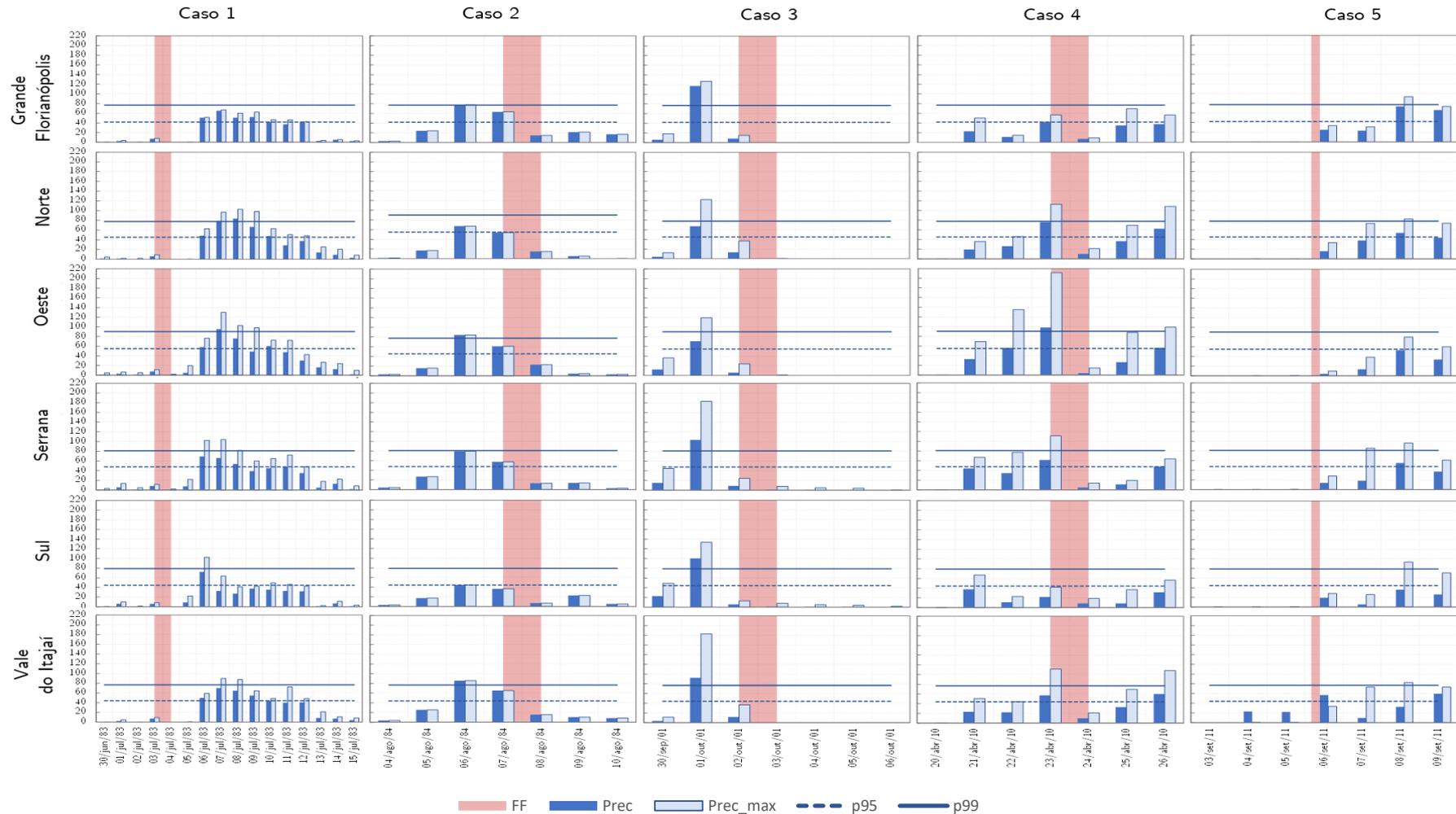


Figura 3.2 - Precipitação diária antes, durante e após a passagem da Frente Fria (FF) para os 10 casos selecionados. Valor médio nas mesorregiões (Prec), valor máximo encontrado em cada mesorregião (Prec_max) e percentis médios (p95 - 95° e p99-99°). A passagem da FF está marcada em sombreado rosa (contínua).

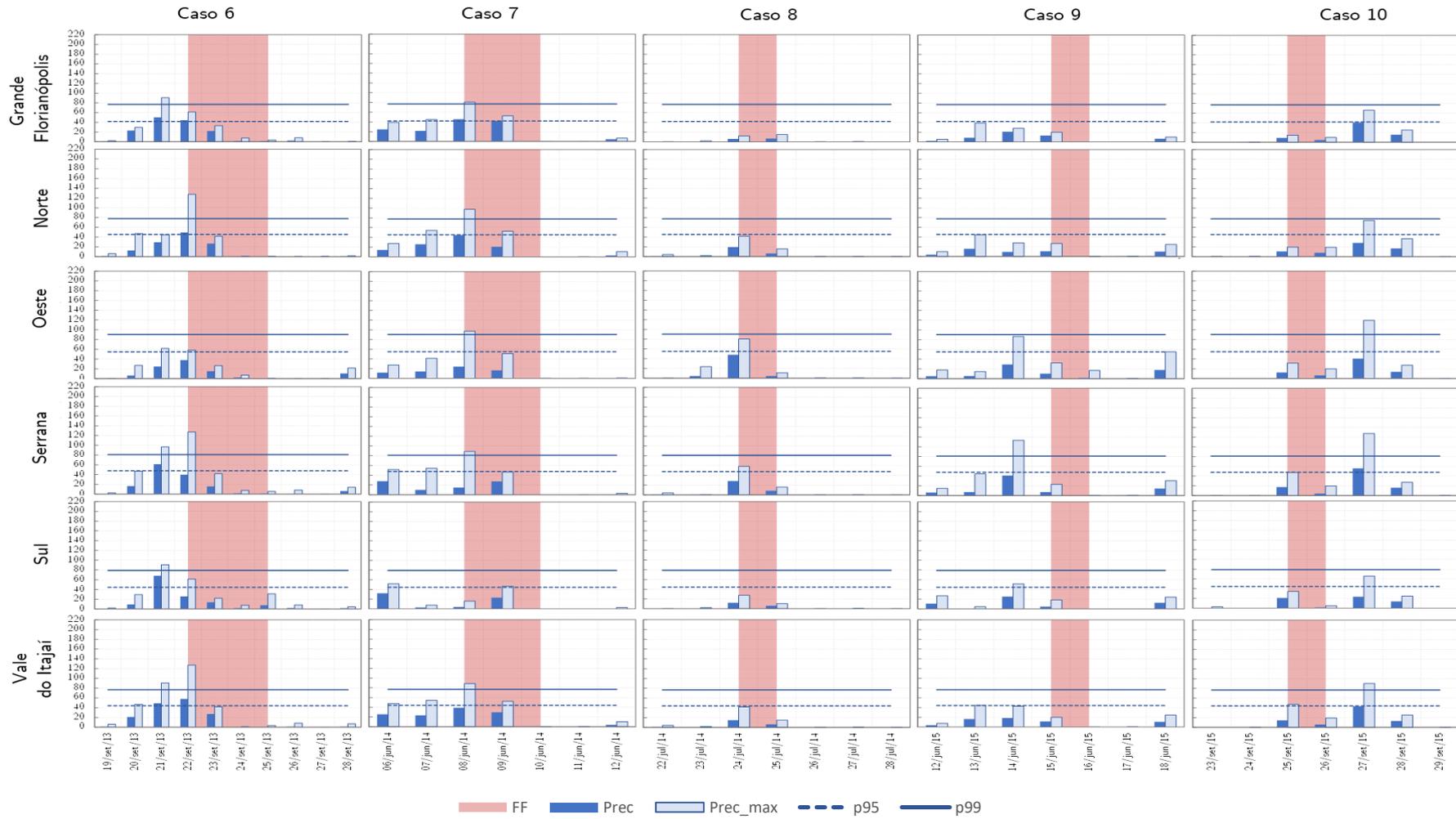


Figura 3.2 - Continuação

Além da avaliação dos acumulados diários de chuva associados aos eventos, foi também analisado o ambiente sinótico-dinâmico, pré e pós-frontal. Como as frentes atmosféricas são influenciadas pelos processos próximos à superfície, tais como os fluxos de umidade, foram feitas avaliações dos valores de umidade específica no nível atmosférico de 925 hPa, além das avaliações dos índices CAPE e LI e da velocidade do vento a 10 m. Foram realizadas análises através de campos espaciais, todavia, com intuito de manter a fluidez e a concisão do texto, é demonstrado através da Tabela 3.1 e a Figura 3.3 apenas um resumo dos resultados obtidos. Assim como apresentado no produto de avaliação de FF intensas – Relatório produto 5 (MMA-GIZ, 2019), as FF estiveram associadas a um ambiente pré-frontal, mais precisamente um dia antes da passagem (-1 dia), com altos valores de umidade específica (Tabela 3.1). Os valores foram superiores a 10 g/kg em todas as mesorregiões, conforme apresentado na Figura 3.3c (linha de base traçada em 10,5 g/kg).

Em relação a intensidade do vento, o aumento decorreu um dia antes (-1 dia) e até no dia da passagem da FF (0 dia) (Tabela 3.1). Entre os eventos selecionados, o caso que apresentou vento mais intenso foi o de julho de 2014 (caso 8). Neste evento, a velocidade do vento em todas as mesorregiões foi superior a 40 km/h e em algumas delas chegou a ser superior a 50 km/h. Através do comparativo das ocorrências, não foi possível traçar uma linha de base para a intensidade do vento devido uma grande variação dos valores entre os eventos.

Quanto aos IIA, verificou-se que tanto o CAPE quanto o LI mostraram aumento de instabilidade no ambiente pré-frontal, ou seja, um dia antes da passagem da FF (figuras apresentadas no Apêndice B). Indicativos de tempestades, de acordo com os limiares da literatura (Nascimento et al. 2005), foram encontrados mais claramente nos valores de LI que demonstrou, em quase todos os casos, valores inferiores a 0°C. Apesar do CAPE não ter apresentado limiar de antemão em concordância com indicativo de tempestade, foi possível traçar uma linha de base para todos os eventos, os quais apresentaram valores de no mínimo 445 J/kg (Tabela 3.1 e Figura 3.3).

Tabela 3.1 - Dia da passagem da Frente Fria (FF) em SC dos dez casos selecionados para avaliação, assim como os valores de umidade específica, velocidade do vento a 10 m (VV10m) e os índices de instabilidade CAPE e LI. São apresentados os dias e os valores que apresentaram mais intensos durante a ocorrência do evento. -1 dia – um dia antes da passagem da FF, 0 dia – dia da passagem da FF, +1 dia – um dia após a passagem da FF e +2 dias – dois dias após a passagem da FF.

Casos	Mês/ Ano	Dia da passagem da FF	Umidade específica		VV10m		CAPE		LI	
			Dia	Valor (g/kg)	Dia	Valor (km/h)	Dia	Valor (J/kg)	Dia	Valor (°C)
1	jul/83	03 e 04	-1 dia	> 13	-1 dia	20-34	-1 dia	919	-1 dia	-3,4
2	ago/84	07 e 08	-1 dia	> 16	0 dia	15-24	-1 dia	2167	-1 dia	-7,5
3	out/01	02 e 03	-1 dia	> 16	-1 dia	28-35	-1 dia	546	-1 dia	-0,9
4	abr/10	23 e 24	-1 dia	>16	-1 dia	18-21	-1 dia	337	-1 dia	0
5	out/11	06	0 dia	>12	-1 dia	29-40	-1 dia	422	-1 dia	1,3
6	set/13	22 a 25	-1 dia	>11	-1 dia	16-22	-1 dia	942	-1 dia	-2,8
7	jun/14	08 e 09	-1 dia	>12	+1 dia	41-32	-1 dia	456	-1 dia	-1,5
8	jul/14	24 e 25	-1 dia	>10	0 dia	39-47	-1 dia	794	-1 dia	-2,5
9	jun/15	15 e 16	0 dia	>12	0 dia	21-28	-1 dia	451	-1 dia	-0,1
10	set/15	25 e 26	-1 dia/+2 dias	>10	0 dia	18-25	0 dia	923	-1 dia	-3,2

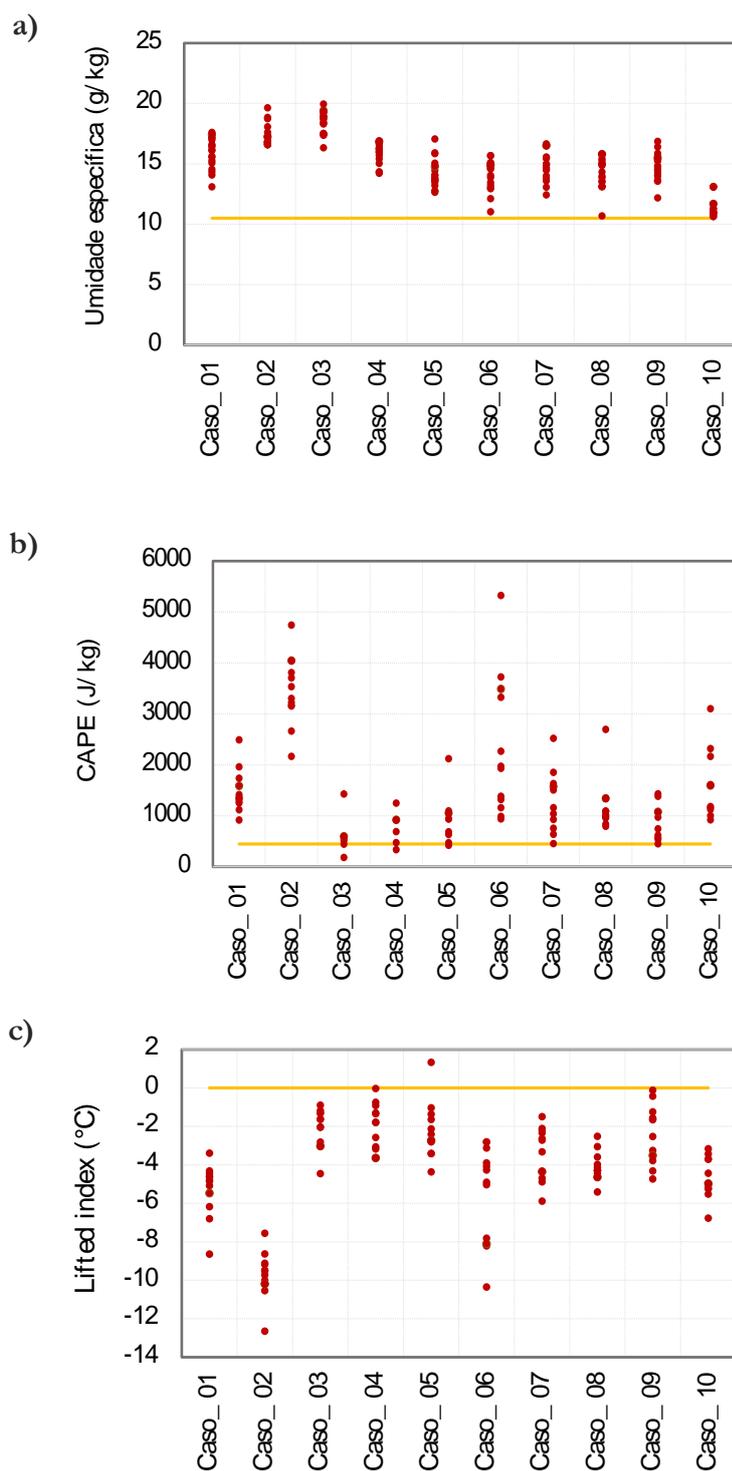


Figura 3.3 - Valores médios e máximos da umidade específica (g/kg) e CAPE (J/kg) e valores médios e mínimos do Lifted Index (°C) antes e durante a passagem das Frentes Frias no estado de Santa Catarina para os 10 casos selecionados para avaliação. Linhas amarelas traçadas nos limiares: a) 10,5 g/kg, b) 445 J/kg e c) 0°C (continua).

Em resumo, os eventos estiveram associados a acumulados de chuvas diárias igual ou superior ao percentil 95°, antes, durante ou após a passagem da FF. Os eventos também estiveram associados a mais altos valores de umidade específica em 925 hPa e de CAPE, e valores mais negativos de LI no ambiente pré-frontal e frontal. Com base nestes resultados, o indicador de FF intensa foi dividido em dois grupos: **1 - FF associadas a extremos de chuvas** e **2 - FF associadas a ventos intensos a 10 m**. Esta divisão foi realizada para atender tanto à demanda dos parceiros do Porto de Itajaí quanto à demanda dos parceiros da Eletrosul.

No primeiro grupo, além do critério padrão de FF (mostrada na subseção 2.4), utilizou-se a estimativa dos percentis de chuva diária. Sendo assim, consideraram-se os valores de chuva superiores ao percentil 95° até 48 horas antes da passagem da FF, durante e até 48 horas após a passagem. Além dos percentis de chuva, foram adicionados mais três ingredientes atmosféricos: umidade específica em 925 hPa maior igual a 10,5 g/kg, CAPE maior igual a 445 J/kg e LI inferior a 0°C. Para estas três condições, o critério pode ser satisfeito atingindo o valor de qualquer um dos ingredientes atmosféricos.

No segundo grupo, além do critério padrão de FF, utilizou-se a estimativa dos percentis do vento máximo diário. Desse modo, para cada ponto de grade central ou oito pontos ao redor do ponto de grade central consideraram-se os valores de vento superiores ao percentil 99° até 24 horas antes e durante a passagem da FF. Para tal, foram usados dados da intensidade do vento a 10 m oriundos das reanálises do ERA-Interim. Na extração do vento máximo diário, foram considerados os horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. Na Figura 3.4, são apresentados os valores dos percentis 99°, considerando a série temporal de 1998 a 2010. Nota-se que os ventos mais intensos foram encontrados na região Sul de Santa Catarina, sendo superior a 50 km/h. A segunda e terceira mesorregião que apresentaram extremos de vento mais altos foi a Serrana seguida pela Oeste, com intensidade superior a 45 km/h. Nas demais mesorregiões os valores foram superiores a 42 km/h.

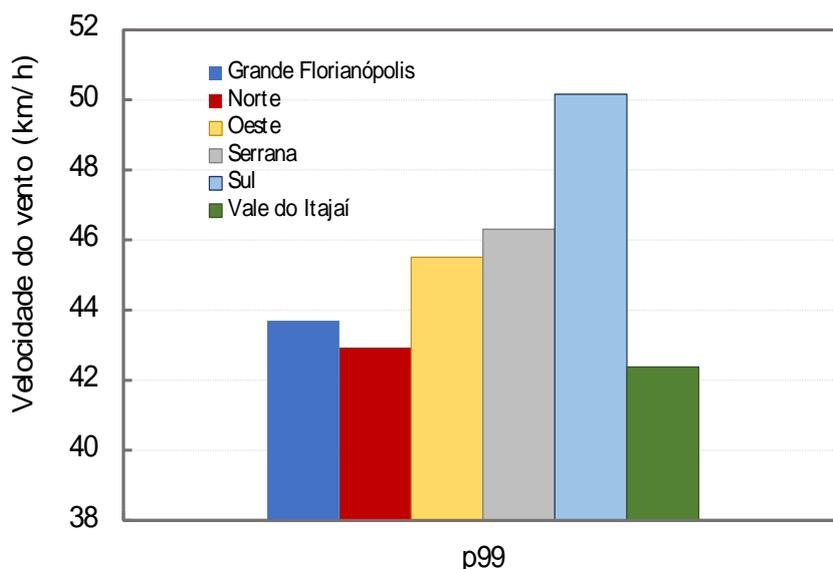


Figura 3.4 - Valores referentes ao percentil 99º do valor do vento máximo diário (km/h). Considerou-se dados da velocidade do vento nos horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800Z das reanálises do ERA-Interim.

Após a separação dos dois grupos de FF intensas e da criação do algoritmo para identificação das mesmas, os scripts foram executados para o período de 1998 a 2016. A climatologia destes tipos de eventos segue na subseção 3.2. Em relação à FF intensa associada a extremos de vento próximo a superfície, foi possível constatar que o indicador foi capaz de capturar o evento ocorrido em julho de 2014, caso que esteve associado a ventos mais intensos durante a passagem da FF sobre Santa Catarina (Figura 3.5).

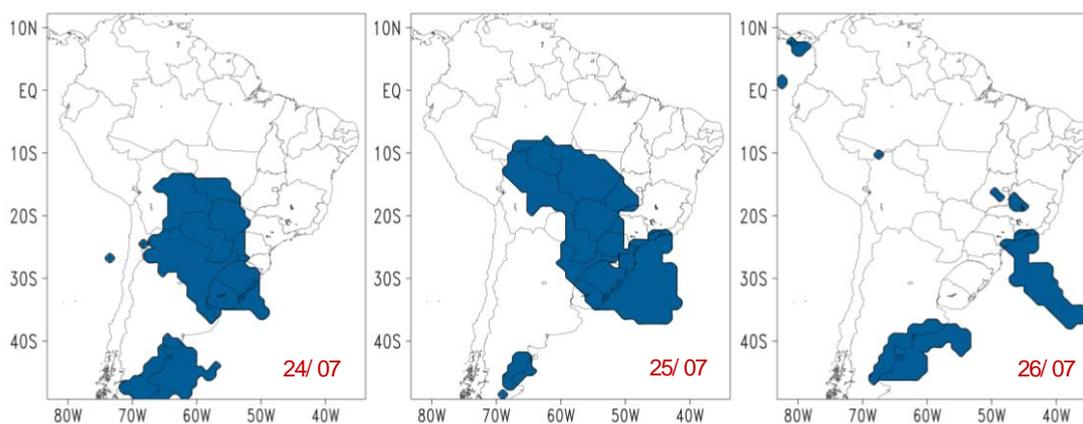


Figura 3.5 - Indicador de Frentes Frias intensas associadas com ventos intensos a 10 m (percentil 99º). Evento ocorrido no mês de julho de 2014 (caso 8).

A Figura 3.6 mostra o indicador de FF intensas, associadas a extremos de chuva, com potencial para causar danos ou interrupção das atividades do Porto de Itajaí-SC. É apresentado apenas um dia de cada evento apenas para

os casos selecionados a partir de 1998, devido à ausência de dados anteriores do conjunto do MERGE/INPE. Verificou-se que o indicador construído conseguiu capturar os casos selecionados e em suma, tem-se que o método utilizado é eficaz na identificação da passagem das FF intensas sobre Santa Catarina, tanto para eventos de chuvas extremas quanto para eventos de vento extremo.

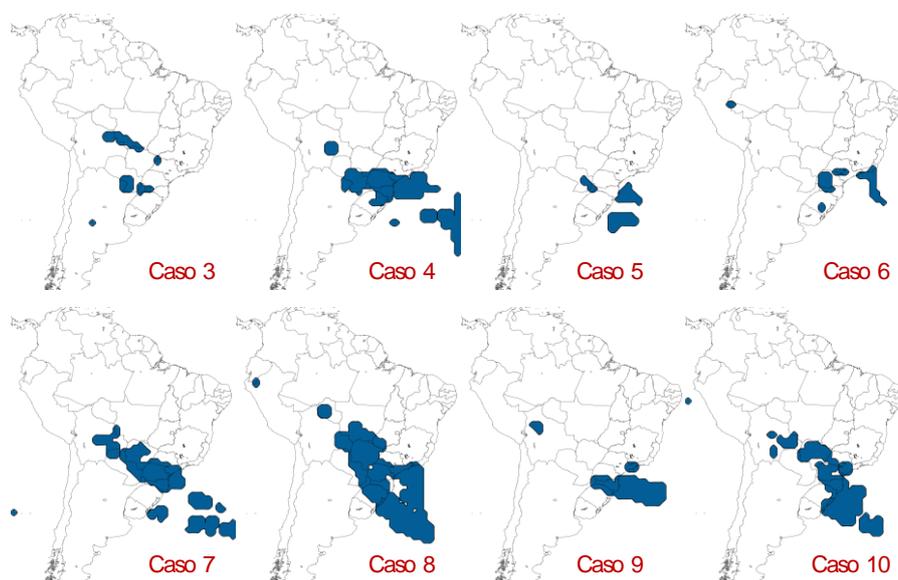


Figura 3.6 - Indicador de Frentes Frias intensas, associadas com altos valores de chuva diária (percentil 95°), com potencial para causar danos ou interrupção das atividades do Porto de Itajaí-SC.

3.2 Climatologia de frentes frias intensas

O número médio anual de FF sobre a América do Sul (AS), assim como os valores médios para cada mesorregião de SC, obtido para o período de 1998 a 2010, são mostrados nas Figuras 3.7 e 3.8. De acordo com a climatologia anual das FF em geral (Figura 3.7a), verificou-se a norte de 30°S duas regiões de maior ocorrência de passagem frontal, sendo uma entre a Cordilheiras dos Andes e a região oeste do Brasil, e a outra no litoral sul e sudeste do Brasil. Uma região de máxima ocorrência de passagem de FF (> 90 FF/ano) apareceu na região leste de Argentina, próximo a latitude de 40°S. Os resultados obtidos em termos de padrão espacial estão de acordo com a literatura sobre a incursão frontal na AS, tais como os resultados encontrados por Cavalcanti e Kousky (2009) e Foss et al. (2017), todavia o total anual de FF encontrados por eles foram menores. Esta diferença pode ser atribuída ao método utilizado, tais como o uso de apenas um horário sinótico por Foss et al. (2017) ou valores médios diários por

Cavalcanti e Kousky (2009), o que pode ter contribuído para subestimar a quantidade de passagens de FF.

O padrão de abaulamento das maiores ocorrências também foi notado nas FF associadas os extremos de chuvas e nas FF associadas a vento extremos, os quais apresentaram maiores ocorrências na região oeste e no litoral sul e sudeste do Brasil, incluindo todo estado do Rio Grande do Sul (Figura 3.7 a, b).

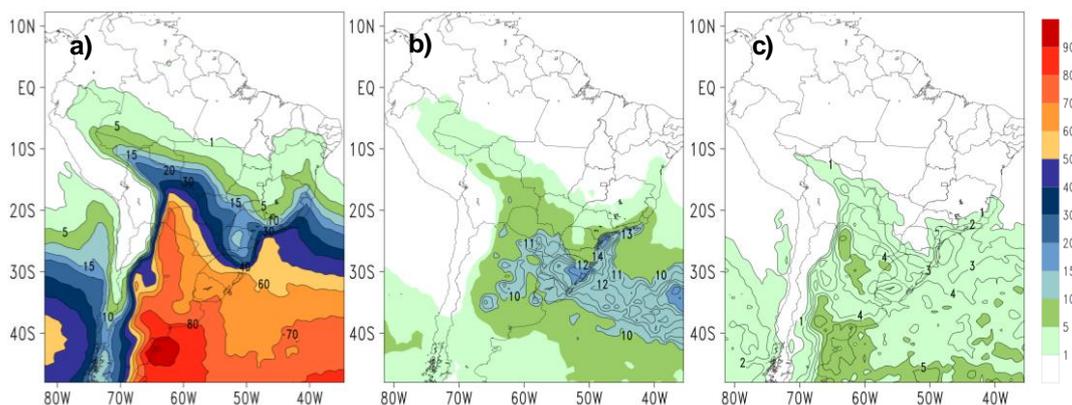


Figura 3.7 - Número médio anual de frentes frias com base na climatologia de 1998 a 2010, obtido através dos dados de reanálise do ERA-Interim, identificado em cada ponto de grade e no nível atmosférico de 925 hPa. Frente frias em geral a) e frentes frias associadas com chuvas intensas (percentil 95°) b) e vento intenso (percentil 99°) b) durante sua passagem. Para as frentes frias associadas a chuvas intensas foram usados, além das reanálises, dados do MERGE.

Notou-se que as mesorregiões Sul e Grande Florianópolis são as que apresentam maiores ocorrências de passagens de FF, tanto para as FF em geral quanto para as FF associadas aos extremos (Figura 3.8). Nestas mesorregiões, os valores médios foram em torno de 36 e 28 FF/ano, para as FF em geral, de 12 e 10 FF/ano para as FF associadas a extremos de chuva e de 3 FF/ano para as FF associadas a vento extremo. Na mesorregião do Vale do Itajaí, os números variaram em torno de 23 FF/ano, para as FF em geral, e 8 FF/ano e 2 FF/ano para as FF associadas a extremos de chuva e vento, respectivamente.

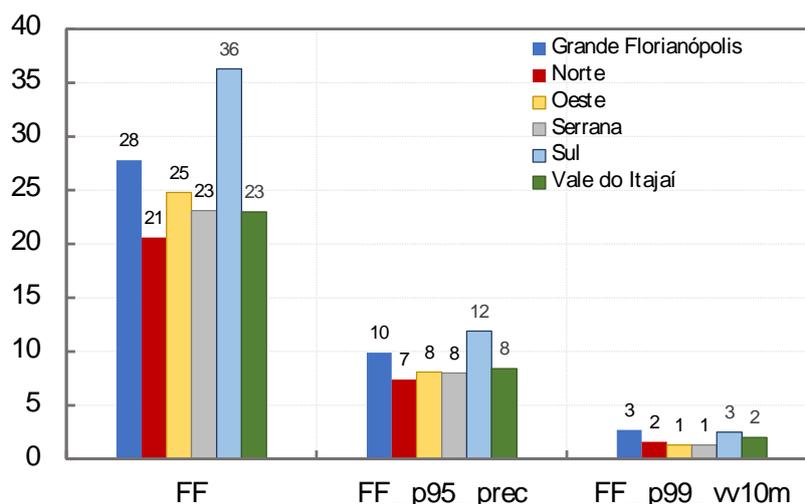


Figura 3.8 - Número médio anual de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e ventos intensos (FF_p99_vv10m) com base na climatologia de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa. Valores médios para as mesorregiões de Santa Catarina, a saber: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí.

A climatologia sazonal e mensal de incursões de FF é mostrada nas Figuras 3.9 e 3.10. As FF, em geral, são mais frequentes no período de Junho-Julho-Agosto (JJA), meses do inverno austral, quando as FF atingem latitudes mais baixas (ao norte de 30°S) e longitude mais ao oeste do que em outras estações do ano (Figura 3.9). Nesta estação do ano, as FF atingem o Brasil central e algumas vezes chegam até a parte sul da região Norte (Marengo et al., 1997, Seluchi et al., 1998; Andrade, 2005). Em Santa Catarina, o maior número de incursões frontais ocorre entre os meses de julho-agosto, sendo da ordem 52-53 FF na mesorregião Sul (área de maior ocorrência) quando considerado os 13 anos de dados analisados (1998-2010). Portanto, as incursões de FF na mesorregião Sul, no período de inverno austral, ocorrem quatro vezes por mês (53 FF/13 anos), ou seja, aproximadamente uma vez por semana. A segunda mesorregião que apresentou maior frequência é a Oeste, com valores entre 46 e 47 FF. Na mesorregião Vale do Itajaí tem-se que agosto é o mês que apresenta maior frequência de passagens frontais, sendo identificado 38 FF no período analisado, ou seja, em média 3 FF no mês.

Em relação climatologia das FF associadas a extremos de chuvas, tanto os campos espaciais (Figura 3.9) quanto as médias para mesorregiões de Santa Catarina (Figura 3.10) demonstram que, em geral, os meses de maior frequência correspondem o período da primavera austral (Setembro-Outubro-Novembro/SON), sendo outubro o mês de maior ocorrência, excetuando-se

apenas para a mesorregião Sul. Na mesorregião Sul, o mês que apresenta maior frequência de passagens de FF intensas é julho. Na mesorregião Vale do Itajaí, foram identificados 17 FF para todo período analisado, ou seja, uma frequência de 1 FF/mês. A maior frequência de FF associadas a chuvas extremas no período de primavera austral também foi identificado por Escobar et al (2016) para o leste de Santa Catarina. Segundo os autores, a maior frequência pode estar provavelmente associada ao aumento de conteúdo de umidade em superfície que, juntamente com o contraste de temperatura, proporciona o aumento da intensidade das chuvas (Escobar et al., 2016). Por outro lado, as FF associadas a vento extremo, agosto é o mês que apresenta maior frequência de passagens em todas as mesorregiões de Santa Catarina.

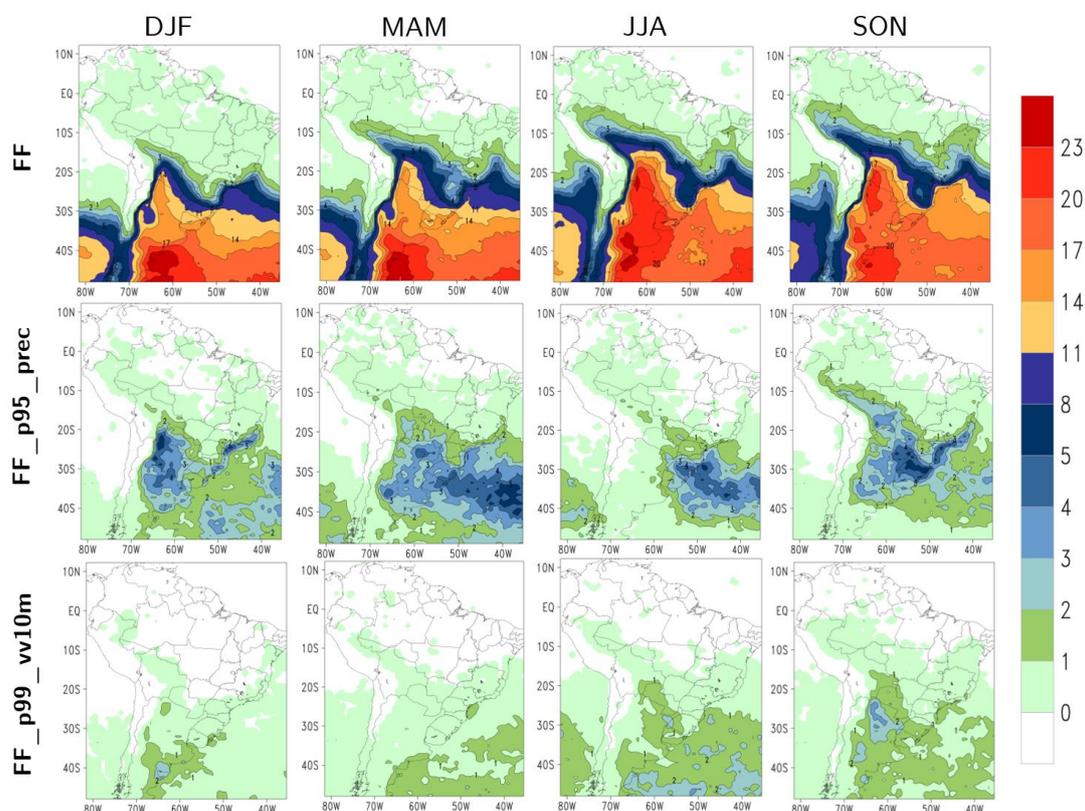


Figura 3.9 - Número médio sazonal de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_var) e ventos intensos (FF_vv10m_p99) com base na climatologia de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa. Para as frentes frias associadas a chuvas intensas foram usados, além das reanálises, dados do MERGE.

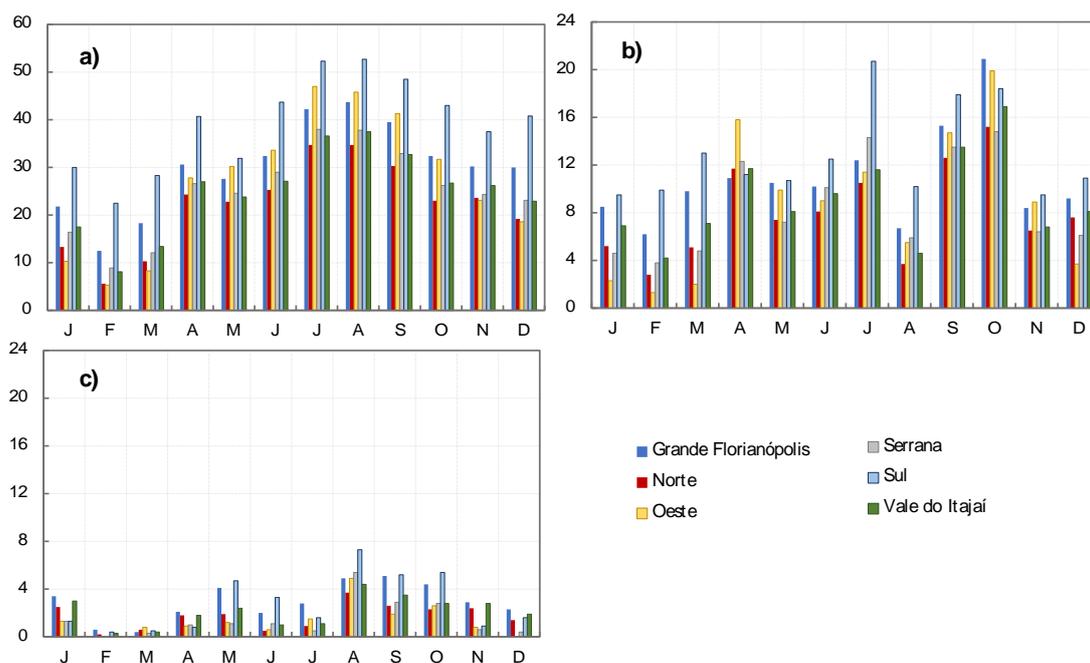


Figura 3.10 - Total mensal de Frentes Frias (FF) e FF associadas a chuvas intensas (FF_p95_prec) e ventos intensos (FF_p99_vv10m) com base na climatologia de 1998 a 2010. A climatologia foi obtida através dos dados das reanálises do ERA-Interim para o nível atmosférico de 925 hPa. Valores médios para as mesorregiões de Santa Catarina, a saber: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí.

4. SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises dos casos de Frentes Frias (FF) intensas com relatos de danos e/ou interrupção das atividades do Porto de Itajaí foi possível identificar critérios objetivos para a criação de um indicador de FF com tempo severo. Foram relacionados, além de critérios de identificação da passagem frontal, limiares de chuvas diárias, intensidade máxima do vento, umidade específica e dos índices de instabilidade atmosférica CAPE e LI. As frentes frias intensas foram divididas em dois grupos: frentes frias associadas a chuvas extremas (percentil 95°) e frentes frias associadas a ventos extremos (percentil 99° do vento). O algoritmo criado conseguiu capturar os eventos selecionados pelos parceiros do Porto do Itajaí e da EPAGRI-CIRAM e, em seguida, foram aplicados numa série temporal de 13 anos (1998-2010) com intuito de obter uma “climatologia” para estes tipos de eventos. A partir desta climatologia, identificou-se que as FF severas são associadas a chuvas fortes nas mesorregiões de interesse dos Parceiros do Porto de Itajaí e da Eletrosul, ou seja, Vale do Itajaí e Oeste, ocorrem mais frequentemente no mês de outubro. Por outro lado, nestas mesmas mesorregiões, as FF associadas a vento extremo ocorrem mais

frequentemente no mês de agosto. Em termos anuais, os valores médios encontrados para as FF associadas a extremos de chuva e vento, respectivamente, foram de ordem de 8 FF/ano e 2 FF/ano na mesorregião Vale do Itajaí e de 8 FF/ano e 1 FF/ano na mesorregião Oeste. Estes resultados são essenciais para o desenvolvimento da próxima etapa, a qual consiste em aplicar o indicador de FF severa em cenários de mudanças climáticas, com base nas saídas do modelo regional Eta.

Lista de contribuições do produto 6: desenvolvimento do indicador, estatística de fontes revisitadas, identificação de regiões mais expostas à FF de alta pluviosidade e alta poder destrutivo pela intensidade do vento e identificação do mês do ano que estes extremos são mais frequentes.

5. PRÓXIMA ETAPA

Entrega do relatório referente ao Produto 8, o qual conterà a análise dos índices de instabilidade (frentes frias e passagens pré-frontais) para as principais áreas de interesse em Santa Catarina a partir dos resultados do Eta-20km forçado pelos modelos HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM, e do Eta-5km forçado pelo HadGEM2-ES, ambos considerando o baseline, RCP4.5 e RCP8.5. Assim como, os resultados da aplicação do indicador de FF com tempo severo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMI, S.; ROSA, T. Brusque: cidade Schneeberg. Itajaí: S&T Editores. 2005.
- ANDRADE, K. M. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2005-04-04. 185 p. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Mestrado em Meteorologia. São José dos Campos. 2005.
- BLUESTEIN, H. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Oxford university Press, 594 pp., 1993.
- CAVALCANTI, I.; KOUSKY, V. Frentes frias sobre o Brasil. Tempo e clima no Brasil. São Paulo, Oficina de Textos, p. 135–148, 2009.
- DAVIES, J. M. Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. In: Preprints, 17th Conf. Severe Local Storms, EUA, Amer. Meteor. Soc., p. 107-111, 1993.
- DAVIES-JONES, R.; BURGESS, D.; FOSTER, M.D. Test of helicity as a tornado forecast parameter. In: Preprints, 16th Conf. Severe Local Storms, Kananaskis Park, Canadá, Amer. Met. Soc., p. 588-592, 1990.
- ESCOBAR, G. C. J.; SELUCHI, M. E.; ANDRADE, K. Classificação sinótica de frentes frias associadas a chuvas extremas no leste de Santa Catarina (SC). Revista Brasileira de Meteorologia, v.31. n. 4(suppl), 649-661, 2016. DOI: 10.1590/0102-778632120150095
- ESCOBAR G. Jatos de Altos Níveis, In: IRACEMA F.A. CAVALCANTI; NELSON J. FERREIRA, MARIA JUSTI DA SILVA; MARIA ASSUNÇÃO S. DIAS (Org.). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos, 2009.
- FOSS, M. Efeitos da orografia do sudeste da América do Sul na estrutura dos sistemas frontais. Tese (doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Doutorado em Meteorologia. São José dos Campos, 2016
- FOSS, M.; CHOU, S. C.; SELUCHI, M. E. Interaction of cold fronts with the Brazilian Plateau: a climatological analysis. International Journal of Climatology, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4945>
- GALWAY, J. G. The lifted index as a predictor of latent instability. Bull. Amer. Meteor. Soc., v. 43, p. 528-529, 1956.
- HART, J. A.; DOROTKY, W. The SHARP workstation v1.50 users guide. National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce, 30 pp., 1991.
- HOUZE, R. A. Cloud Dynamics. Academic Press, 573 pp.,1993.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Divisão Territorial Brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SEA, W. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, v. 125, n.11, p. 2759-2786, Nov. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2)

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA)- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). Relatório produto 2: revisão bibliográfica, com foco na Região Sul, referente aos eventos meteorológicos causadores de danos e prejuízos às linhas de transmissão da Eletrosul (LT's) e ao Porto de Itajaí. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF. 29 pp., 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA)- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). Relatório produto 5: Análise de frequência de frentes frias e pré-frontais com potencial de danos e prejuízos. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF. 28 pp., 2019.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.

ROZANTE, J.R.; Moreira, D.S.; GONÇALVES., L.G.G.; VILA, D.A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. *Weather and Forecasting*, v. 25, p. 885-894, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E.J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. *Monthly Weather Review*, v. 135, n. 4, p. 1290-1309, 2007.

SANTOS, C. F. A enchente em Itajaí (SC): relatos, percepções e memórias. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Humanas e da Educação. Mestrado Profissional em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental, Florianópolis, 2010.

SELUCHI, M.; BEU, CÁSSIA; ANDRADE, K. M. Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 1, 25-37, 2017. DOI:10.1590/0102-778632120150095

SELUCHI, M. E.; SERAFINI, Y. V.; LE TREUT, H. The Impact of the Andes on Transient Atmospheric Systems: a comparison between observations and GCM results. *Monthly Weather Review*, v. 126, n. 4, p. 895-912, Apr. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0895:TIOTAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0895:TIOTAO>2.0.CO;2)

SEVERO, D. L. Estudo de casos de chuvas intensas no estado de Santa Catarina. 1994. 97p. 1994. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

SILVA DIAS, M. A. F. As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. Nota técnica. São José dos Campos, INPE, 2009.

STENSRUD, D. J.; CORTINAS, J. V.; BROOKS, H. E. Discriminating between tornadic and non-tornadic thunderstorms using mesoscale model output. *Wea. Forecasting*, v. 12, p. 613-632, 1997.

THOMPSON, R. L., EDWARDS, R., HART, J. A., ELMORE, K. L., MARKOWSKI, P. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, v. 18, p. 1243-1261, 2003.

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

APÊNDICE A: Indicador de passagem de Frente Fria (FF)

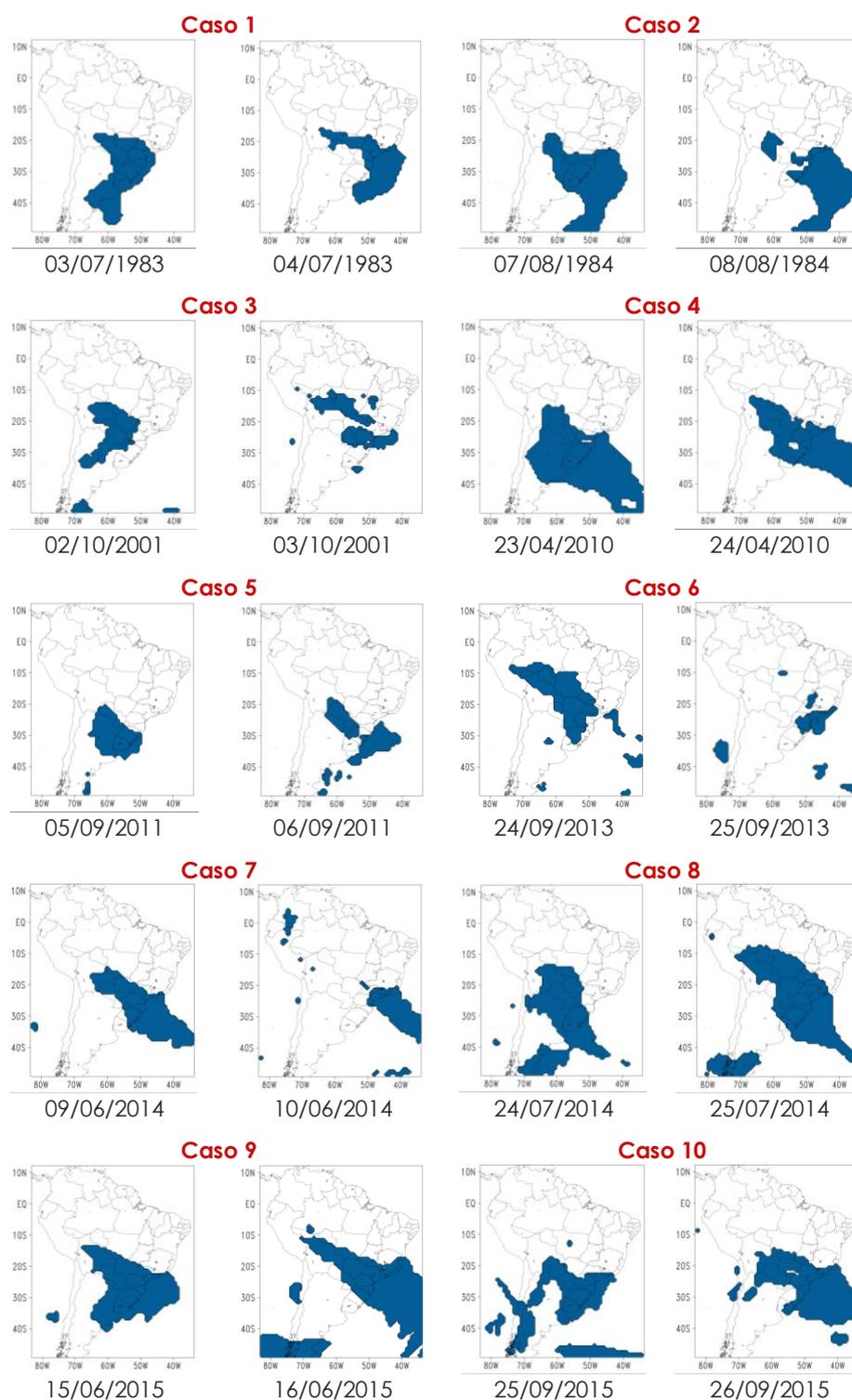


Figura A.1 – Indicador da localização de Frentes Frias para os dez casos selecionados pelos parceiros do Porto de Itajaí e da EPAGRI-CIRAM. O indicador foi construído a partir de adaptações dos critérios de FF adotados por Foss (2016) e Foss et al. (2017) e calculado a partir das reanálises do ERA-Interim

APÊNDICE B: Índices de Instabilidade Atmosférica (IIA)

Campos espaciais dos índices CAPE e LI para os dez casos selecionados de evento de tempo severo associado a passagens de frentes frias e sistemas pré-frontais. São apresentados os campos dos horários sinóticos antes, durante e após a passagem da FF sobre o estado de Santa Catarina.

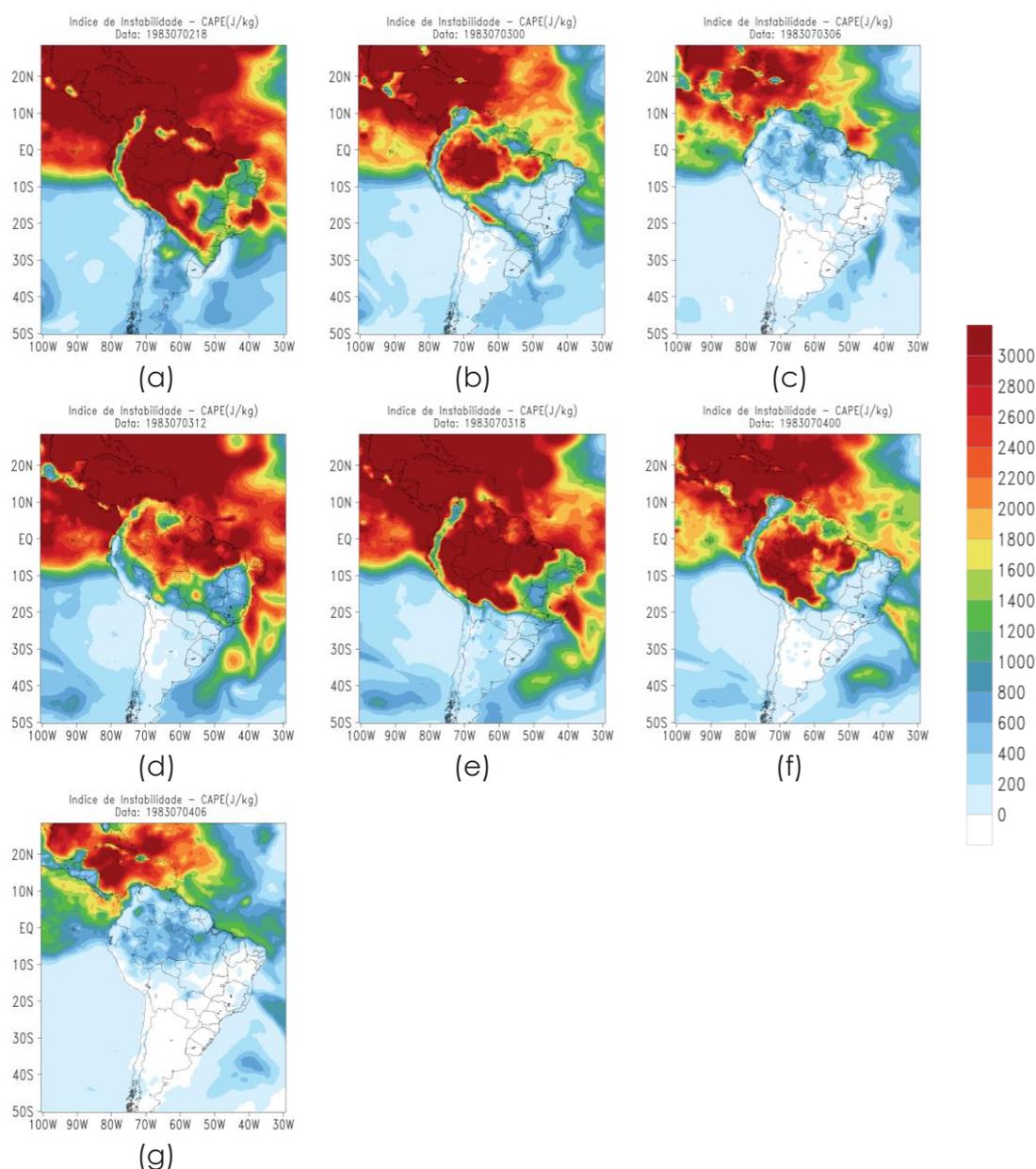


Figura B.1 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 05 e 13 de julho de 1983 – caso 1. a) 02/07/1983 as 1800 UTC, b) 03/07/1983 as 0000 UTC, c) 03/07/1983 as 0600 UTC, d) 03/07/1983 as 1200 UTC, e) 03/07/1983 as 1800 UTC, f) 04/07/1983 as 0000 UTC e g) 04/07/1983 as 0600 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 03 e 04/07/1983.

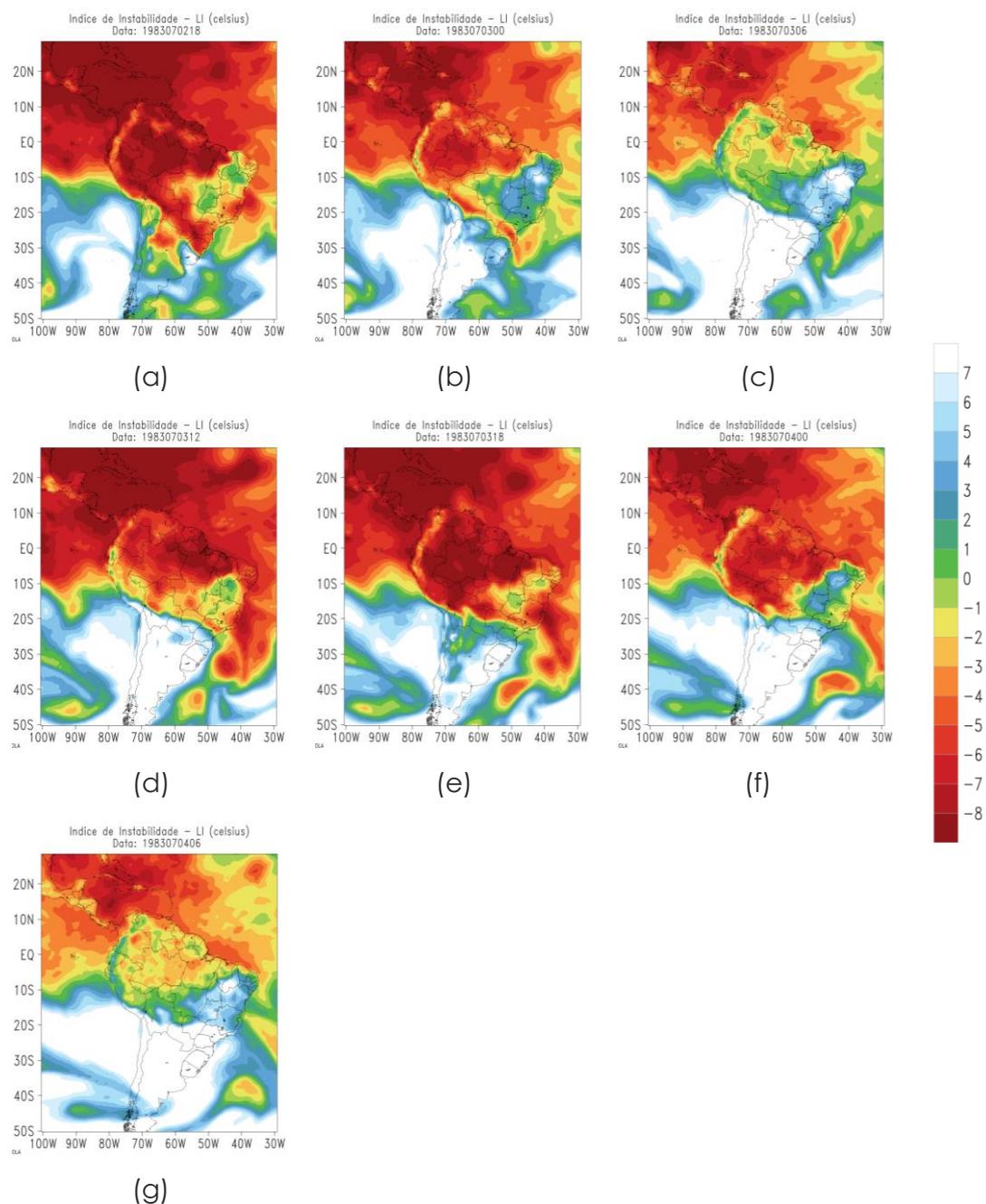


Figura B.2—Índice de instabilidade LI ($^{\circ}\text{C}$) para o evento ocorrido entre os dias 05 e 13 de julho de 1983 – caso 1. a) 02/07/1983 as 1800 UTC, b) 03/07/1983 as 0000 UTC, c) 03/07/1983 as 0600 UTC, d) 03/07/1983 as 1200 UTC, e) 03/07/1983 as 1800 UTC, f) 04/07/1983 as 0000 UTC e g) 04/07/1983 as 0600 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 03 e 04/07/1983.

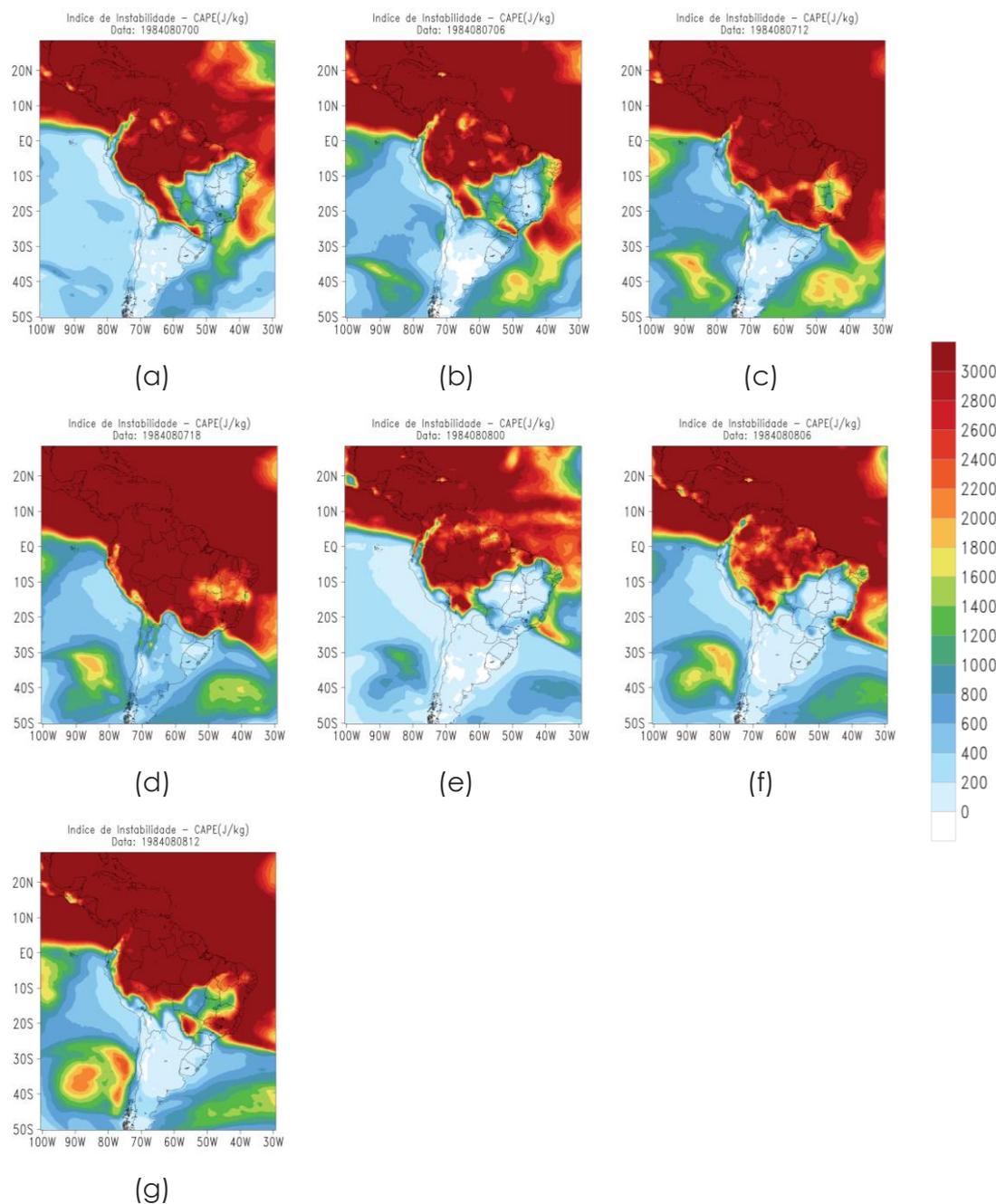


Figura B.3 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 06 e 10 de agosto de 1984 – caso 2. a) 07/08/1984 as 0000 UTC, b) 07/08/1984 as 0600 UTC, c) 07/08/1984 as 1200 UTC, d) 07/08/1984 as 1800 UTC, e) 08/08/1984 as 0000 UTC, f) 08/08/1984 as 0600 UTC e g) 08/08/1984 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 07 e 08/08/1984.

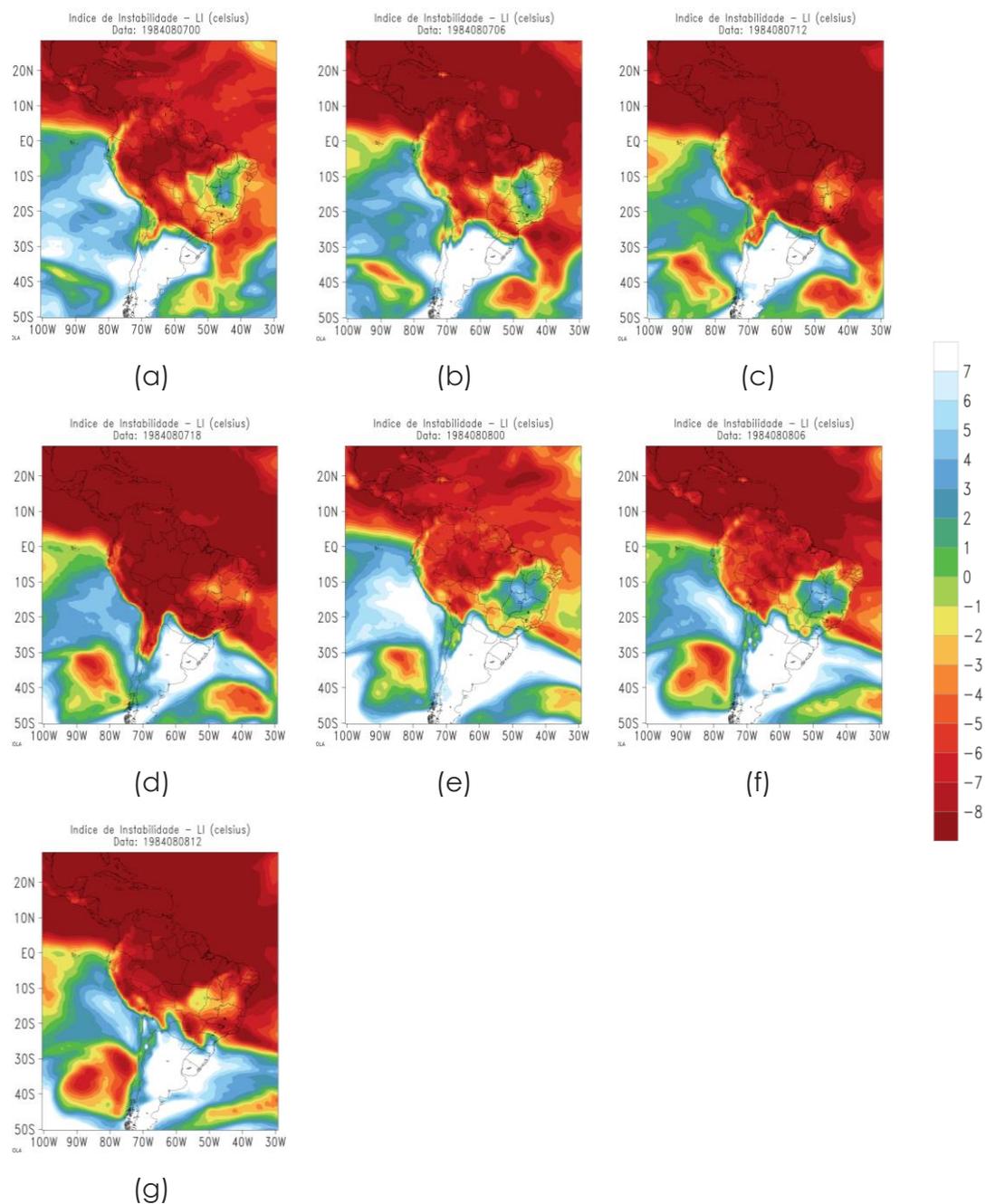


Figura B.4 –Índice de instabilidade LI (°C) para o evento ocorrido entre os dias 06 e 10 de agosto de 1984 – caso 2. a) 07/08/1984 as 0000 UTC, b) 07/08/1984 as 0600 UTC, c) 07/08/1984 as 1200 UTC, d) 07/08/1984 as 1800 UTC, e) 08/08/1984 as 0000 UTC, f) 08/08/1984 as 0600 UTC e g) 08/08/1984 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 07 e 08/08/1984.

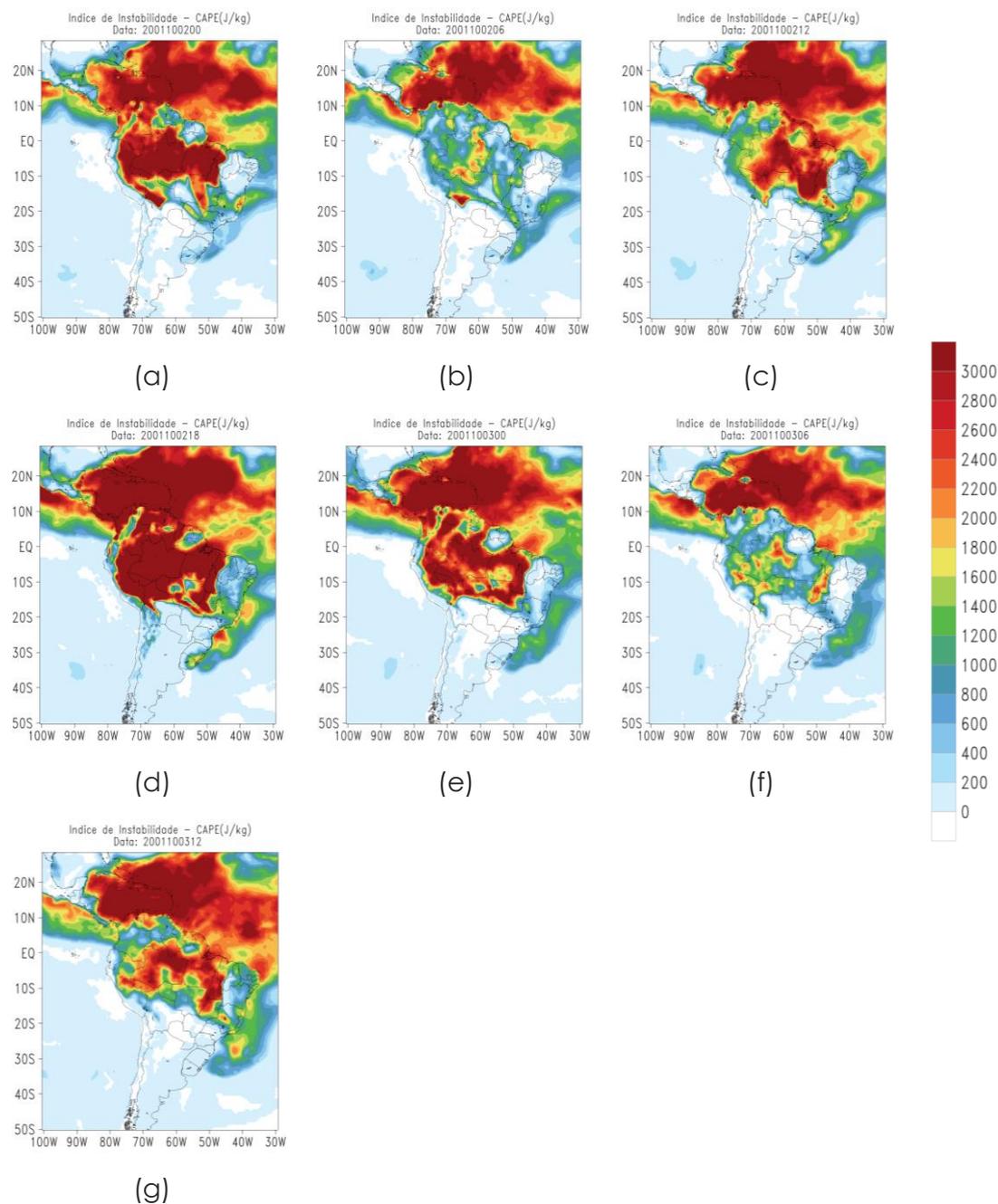


Figura B.5 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 01 e 03 de outubro de 2001 – caso 3. a) 02/10/2001 as 0000 UTC, b) 02/10/2001 as 0600 UTC, c) 02/10/2001 as 1200 UTC, d) 02/10/2001 as 1800 UTC, e) 03/10/2001 as 0000 UTC, f) 03/10/2001 as 0600 UTC e g) 03/10/2001 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 02 e 03/10/2001.

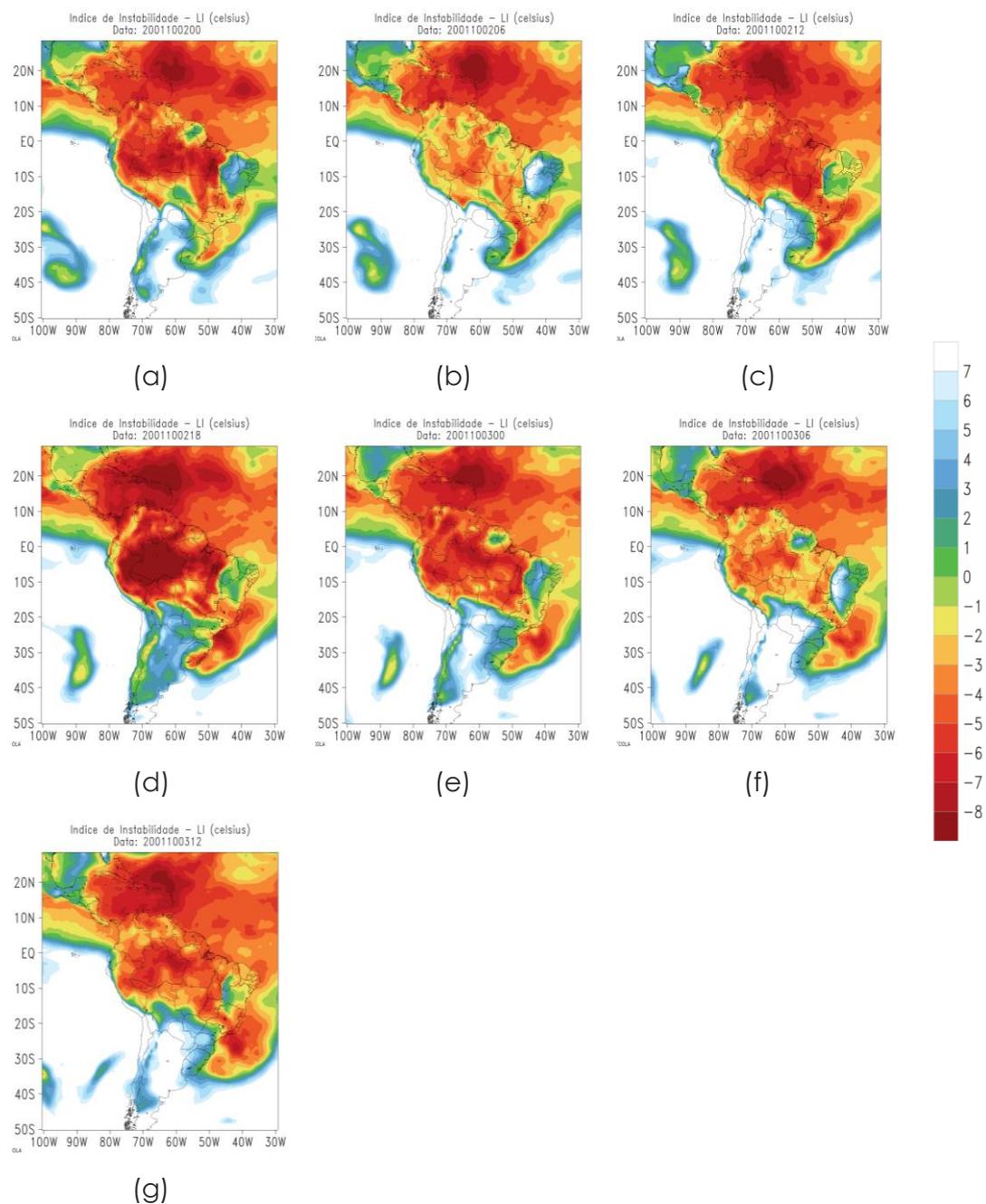


Figura B.6 –Índice de instabilidade CAPE (°C) para o evento ocorrido entre os dias 01 e 03 de outubro de 2001 – caso 3. a) 02/10/2001 as 0000 UTC, b) 02/10/2001 as 0600 UTC, c) 02/10/2001 as 1200 UTC, d) 02/10/2001 as 1800 UTC, e) 03/10/2001 as 0000 UTC, f) 03/10/2001 as 0600 UTC e g) 03/10/2001 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 02 e 03/10/2001.

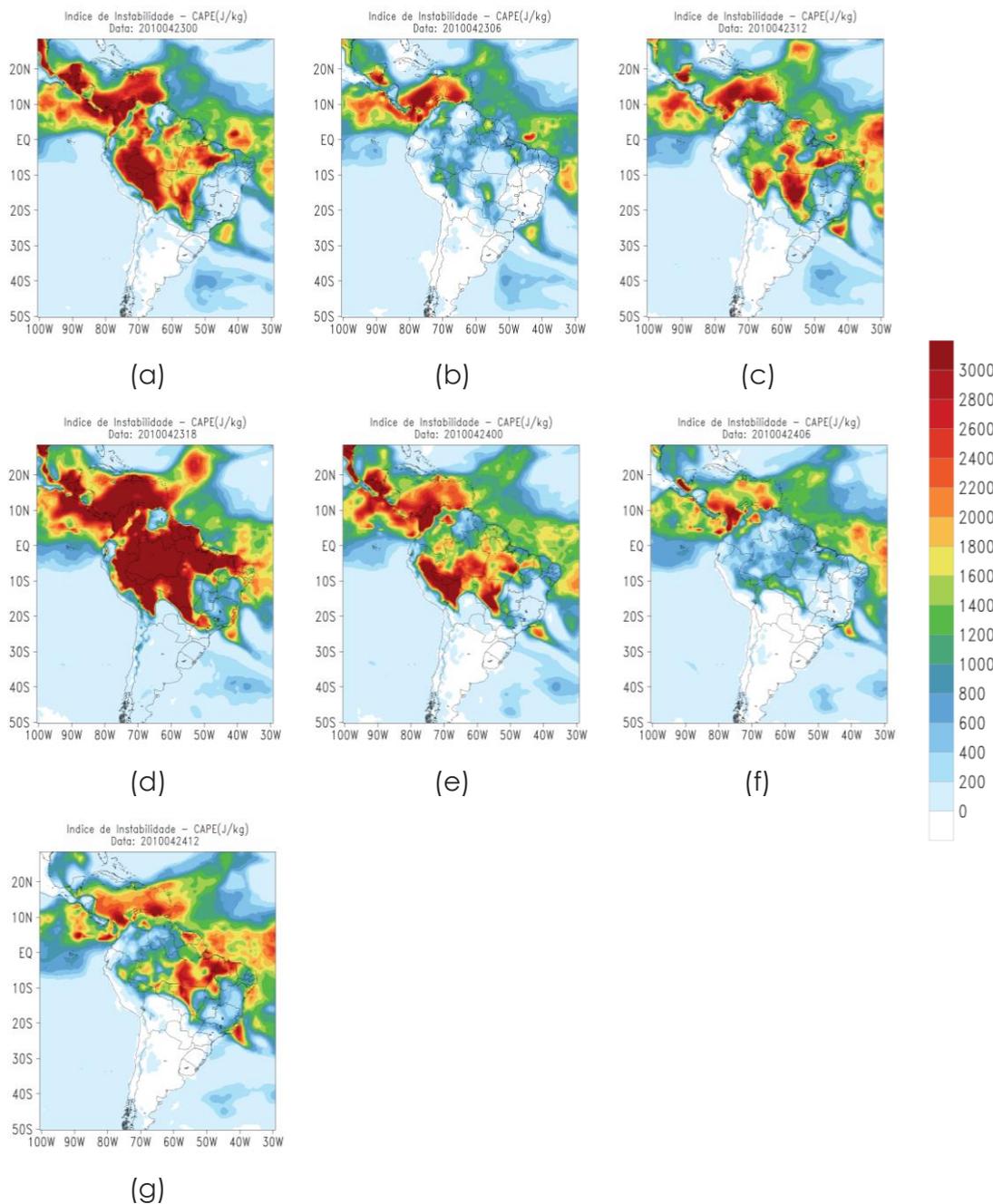


Figura B.7 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 21 e 23 de abril de 2010 – caso 4. a) 23/04/2010 as 0000 UTC, b) 23/04/2010 as 0600 UTC, c) 23/04/2010 as 1200 UTC, d) 23/04/2010 as 1800 UTC, e) 24/04/2010 as 0000 UTC, f) 24/04/2010 as 0600 UTC e g) 24/04/2010 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 23 e 24/10/2001.

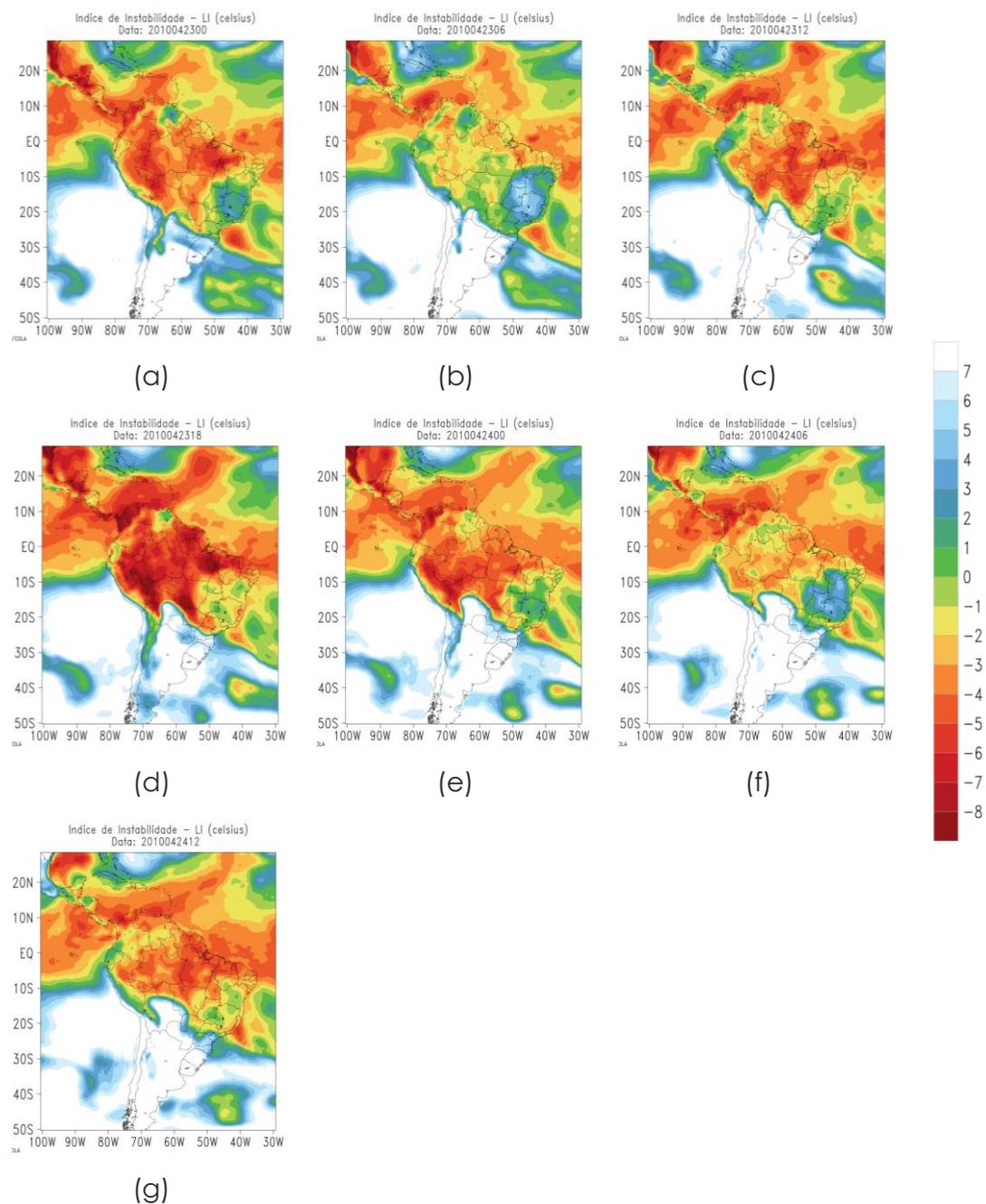


Figura B.8 –Índice de instabilidade LI (°C) para o evento ocorrido entre os dias 21 e 23 de abril de 2010 – caso 4. a) 23/04/2010 as 0000 UTC, b) 23/04/2010 as 0600 UTC, c) 23/04/2010 as 1200 UTC, d) 23/04/2010 as 1800 UTC, e) 24/04/2010 as 0000 UTC, f) 24/04/2010 as 0600 UTC e g) 24/04/2010 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 23 e 24/10/2001.

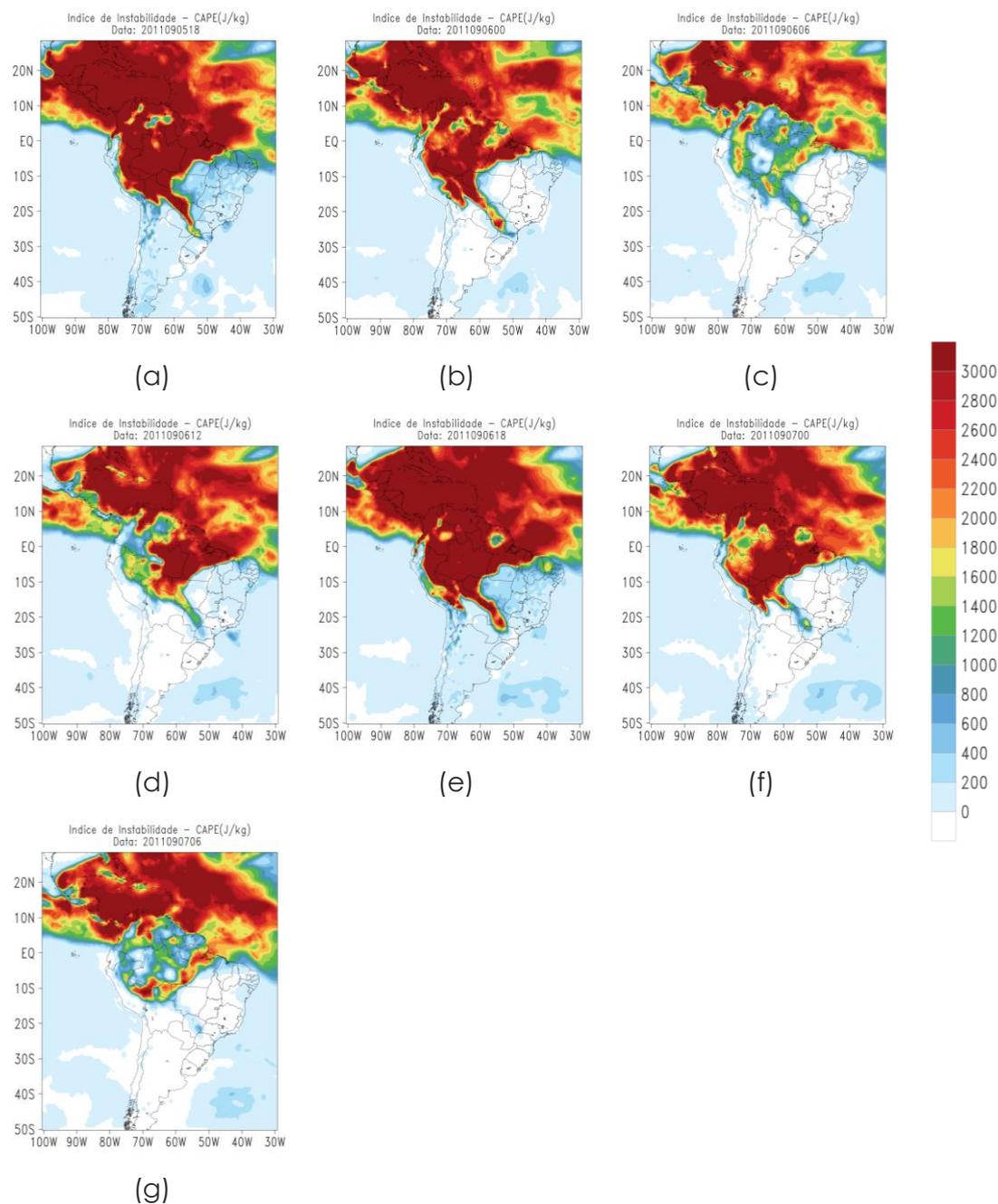


Figura B.9 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 08 e 10 de setembro de 2011 – caso 5. a) 05/09/2011 as 1800 UTC, b) 06/09/2011 as 0000 UTC, c) 06/09/2011 as 0600 UTC, d) 06/09/2011 as 1200 UTC, e) 06/09/2011 as 1800 UTC C, f) 07/09/2011 as 0000 UTC e g) 07/09/2011 as 0600 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dia da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 06/09/2011.

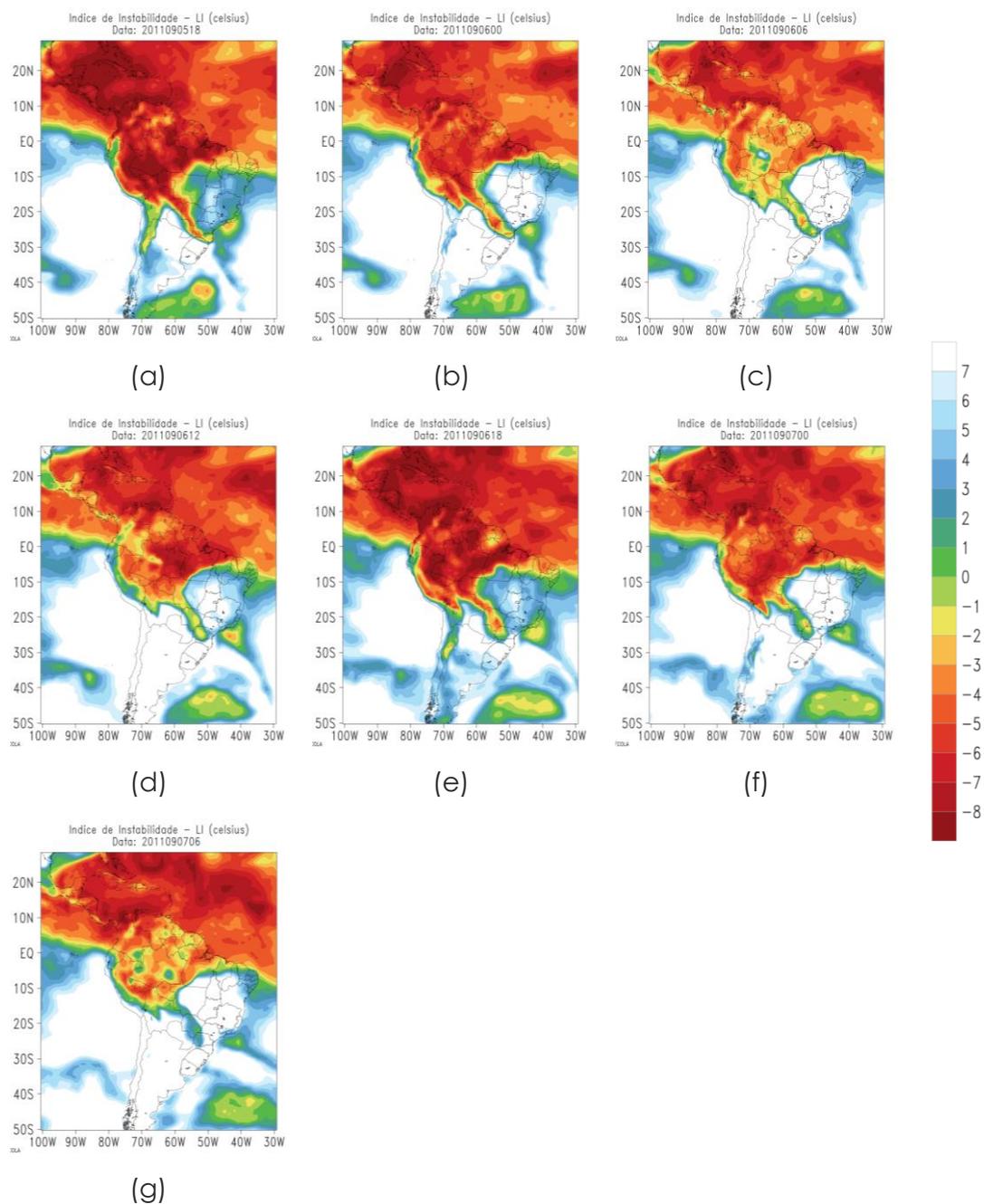


Figura B.10 –Índice de instabilidade LI (°C) para o evento ocorrido entre os dias 08 e 10 de setembro de 2011 – caso 5. a) 05/09/2011 as 1800 UTC, b) 06/09/2011 as 0000 UTC, c) 06/09/2011 as 0600 UTC, d) 06/09/2011 as 1200 UTC, e) 06/09/2011 as 1800 UTC C, f) 07/09/2011 as 0000 UTC e g) 07/09/2011 as 0600 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dia da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 06/09/2011.

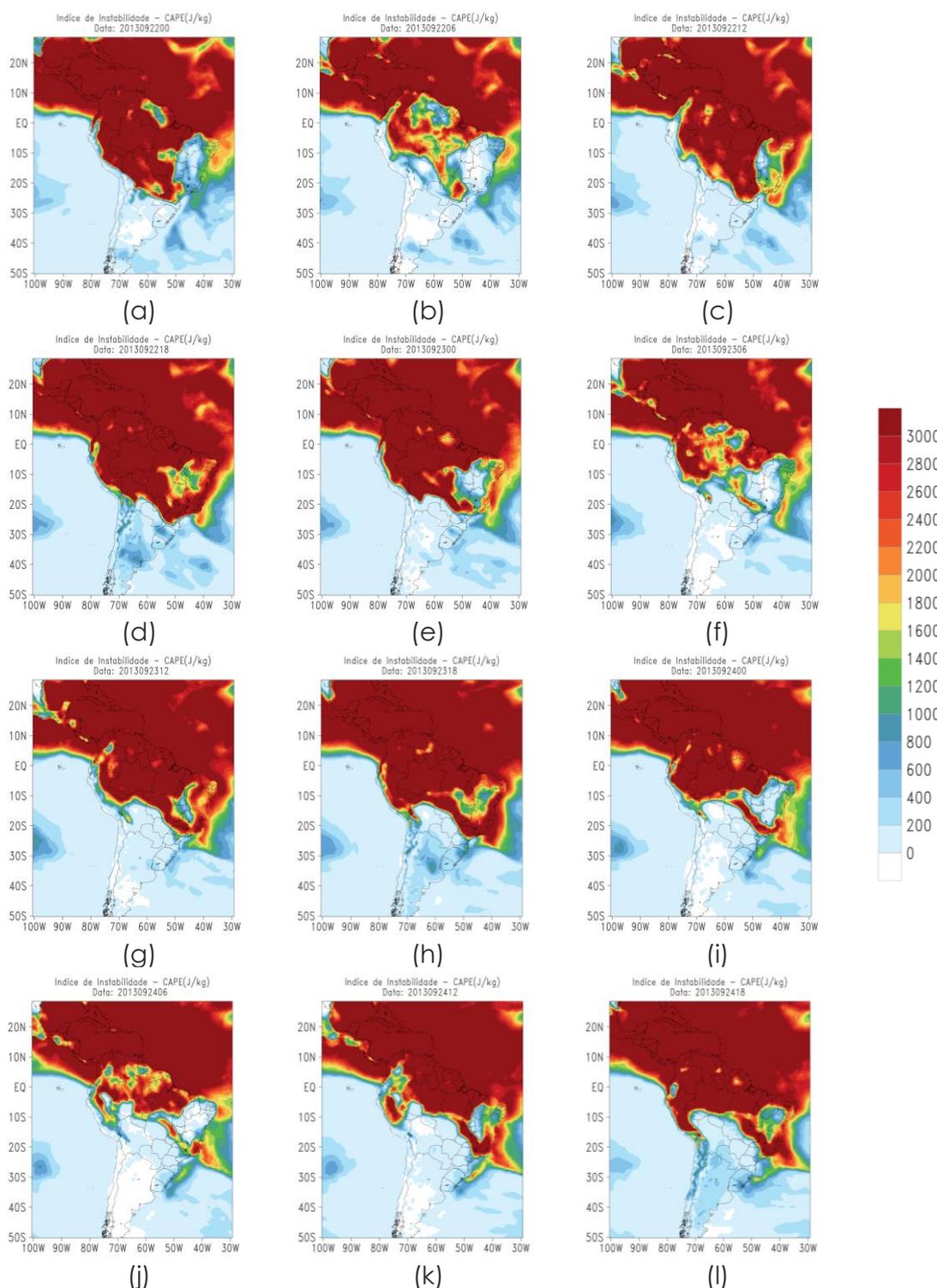


Figura B.11 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 20 e 25 de setembro de 2013 – caso 6. a) 22/09/2013 as 0000 UTC, b) 22/09/2013 as 0600 UTC, c) 22/09/2013 as 1200 UTC, d) 22/09/2013 as 1800 UTC, e) 23/09/2013 as 0000 UTC, f) 23/09/2013 as 0600 UTC, g) 23/09/2013 as 1200 UTC, h) 23/09/2013 as 1800 UTC e i) 24/09/2013 as 0000 UTC, j) 24/09/2013 as 0600 UTC, k) 24/09/2013 as 1200 UTC e l) 24/09/2013 as 1800 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 22 a 25/09/2013.

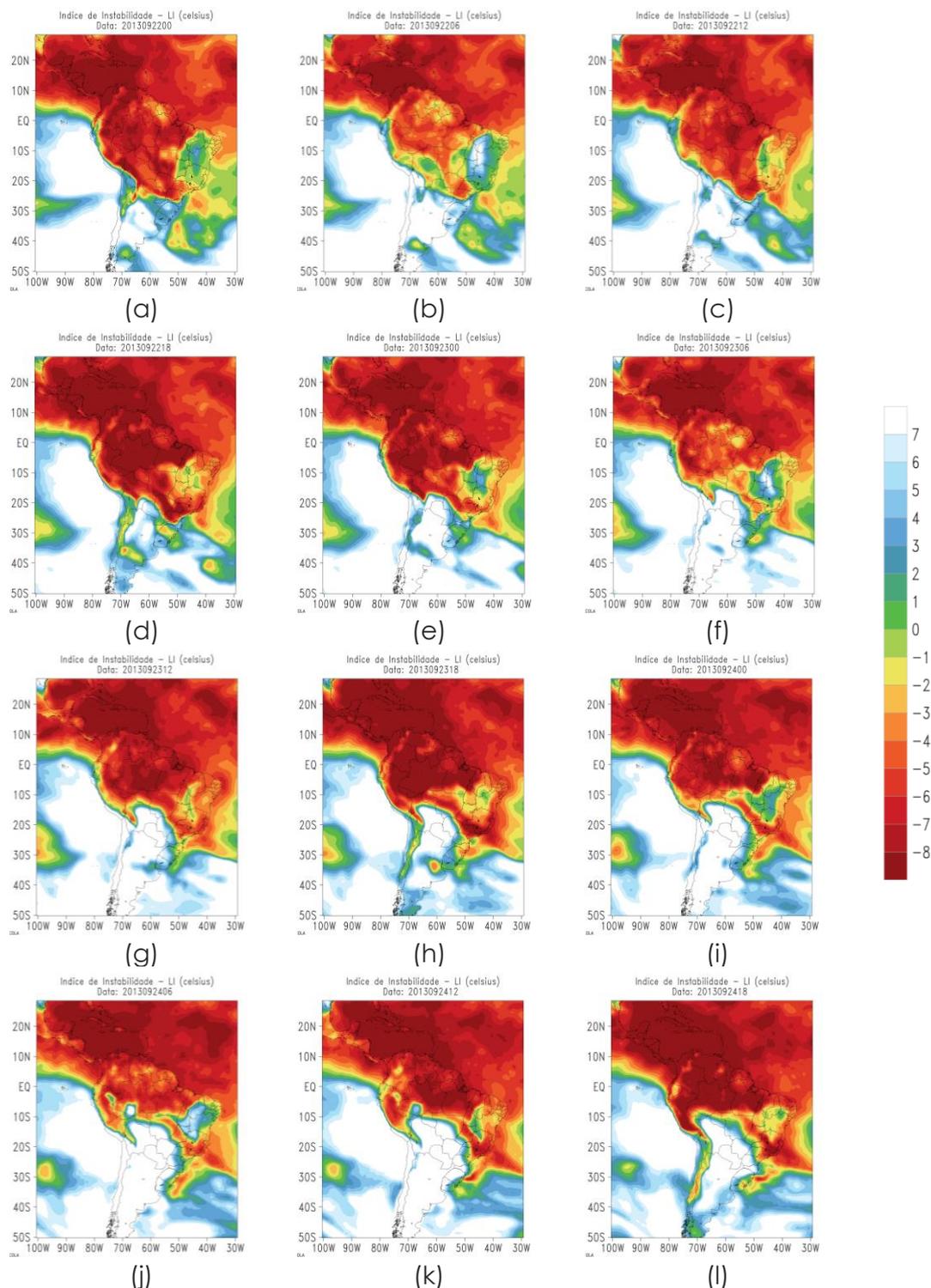


Figura B.12 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 20 e 25 de setembro de 2013 – caso 6. a) 22/09/2013 as 0000 UTC, b) 22/09/2013 as 0600 UTC, c) 22/09/2013 as 1200 UTC, d) 22/09/2013 as 1800 UTC, e) 23/09/2013 as 0000 UTC, f) 23/09/2013 as 0600 UTC, g) 23/09/2013 as 1200 UTC, h) 23/09/2013 as 1800 UTC e i) 24/09/2013 as 0000 UTC, j) 24/09/2013 as 0600 UTC, k) 24/09/2013 as 1200 UTC e l) 24/09/2013 as 1800 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 22 a 25/09/2013.

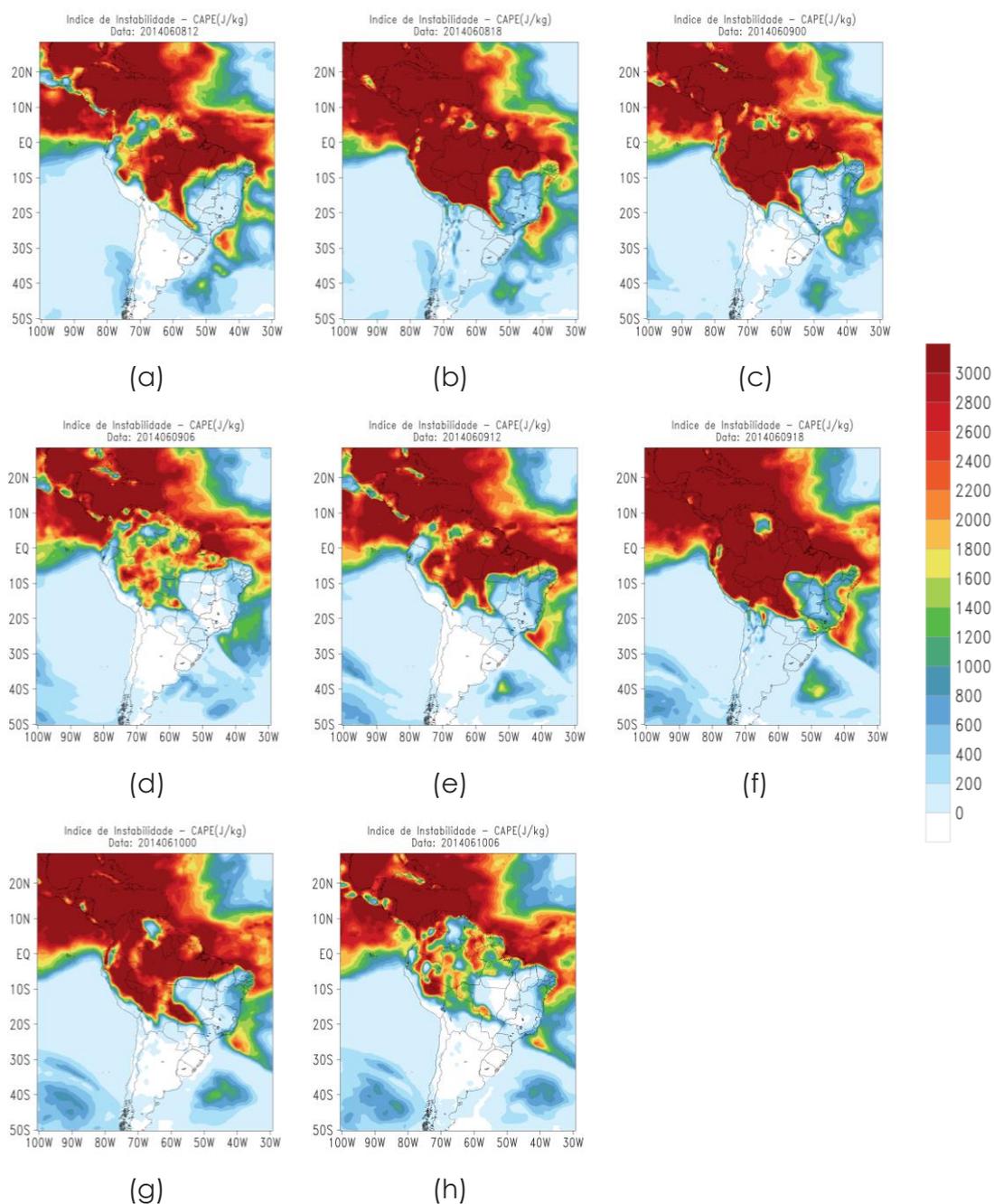


Figura B.13 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 07 e 09 de junho de 2014 – caso 7. a) 08/06/2014 as 1200 UTC, b) 08/06/2014 as 1800 UTC, c) 09/06/2014 as 0000 UTC, d) 09/06/2014 as 0600 UTC, e) 09/06/2014 as 1200 UTC, f) 09/06/2014 as 1800 UTC, g) 10/06/2014 as 0000 UTC e h) 10/06/2014 as 0600 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dia da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 08 e 09/06/2014.

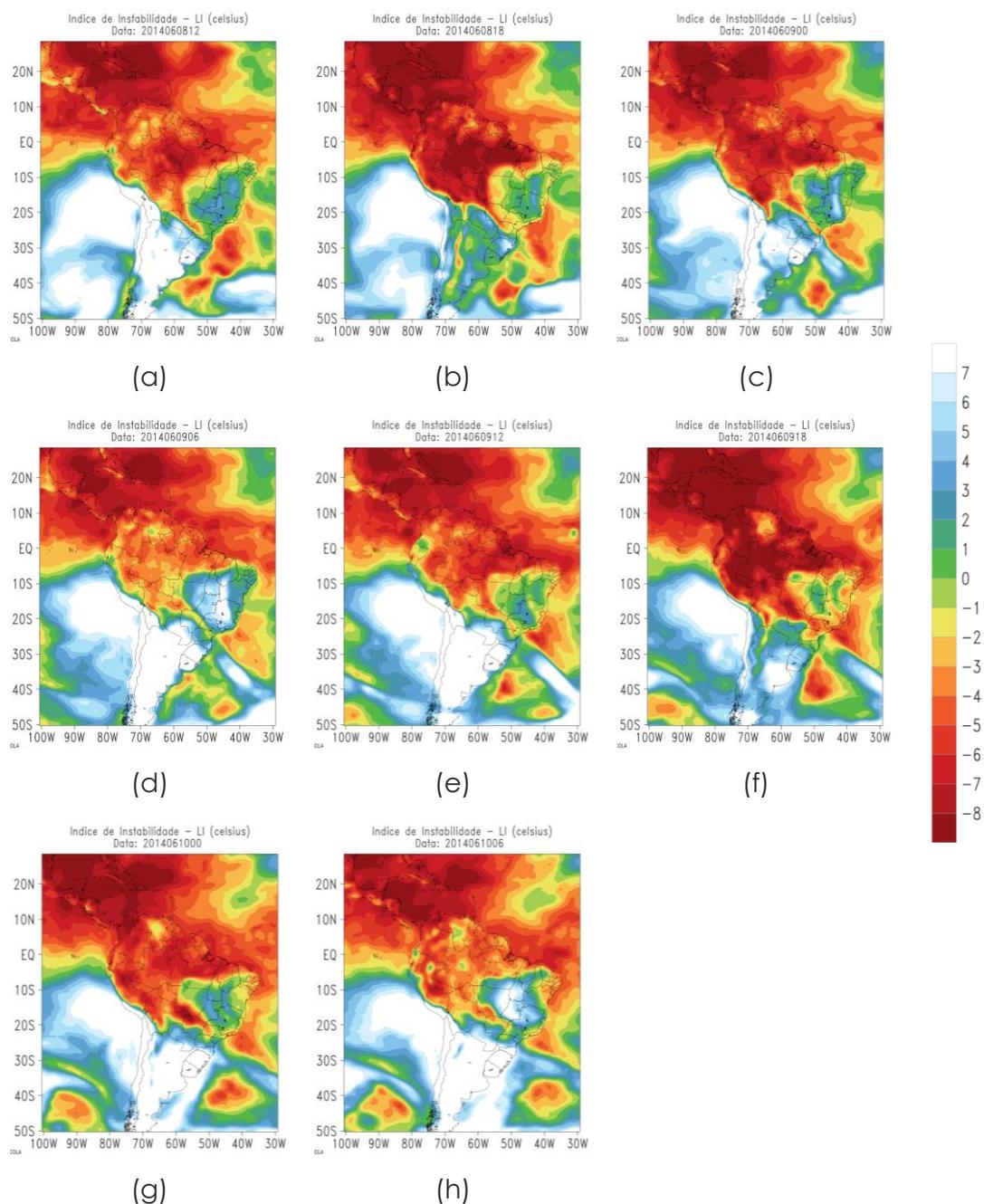


Figura B.14 –Índice de instabilidade LI (°C) para o evento ocorrido entre os dias 07 e 09 de junho de 2014 – caso 7. a) 08/06/2014 as 1200 UTC, b) 08/06/2014 as 1800 UTC, c) 09/06/2014 as 0000 UTC, d) 09/06/2014 as 0600 UTC, e) 09/06/2014 as 1200 UTC C, f) 09/06/2014 as 1800 UTC, g) 10/06/2014 as 0000 UTC e h) 10/06/2014 as 0600 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 08 e 09/06/2014.

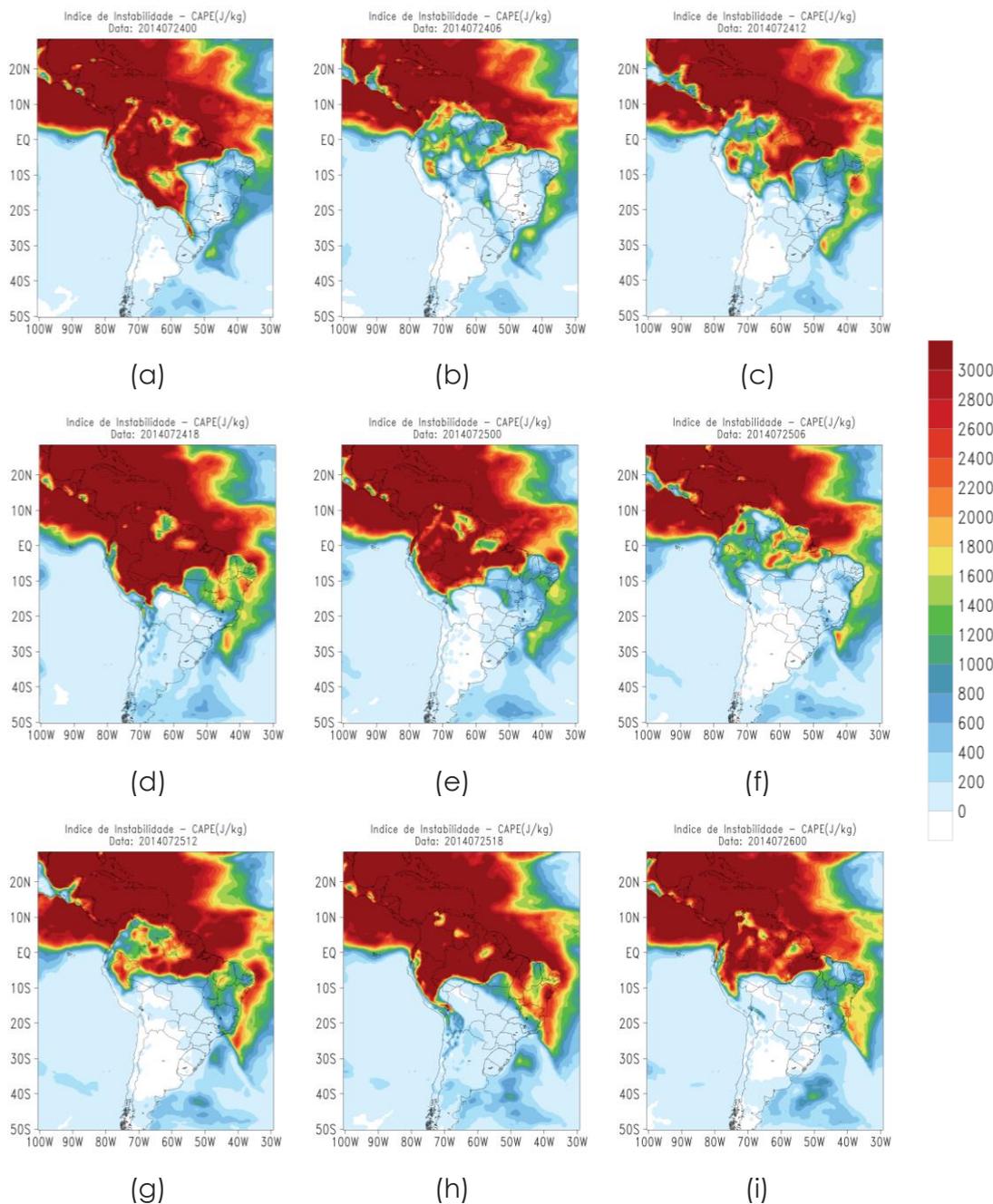


Figura B.15 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 23 e 27 de julho de 2014 – caso 8. a) 24/07/2014 as 0000 UTC, b) 24/07/2014 as 0600 UTC, c) 24/07/2014 as 1200 UTC, d) 24/07/2014 as 1800 UTC, e) 25/07/2014 as 0000 UTC, f) 25/07/2014 as 0600 UTC, g) 25/07/2014 as 1200 UTC, h) 25/07/2014 as 1800 UTC e i) 26/07/2014 as 0000 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 24 e 25/07/2014.

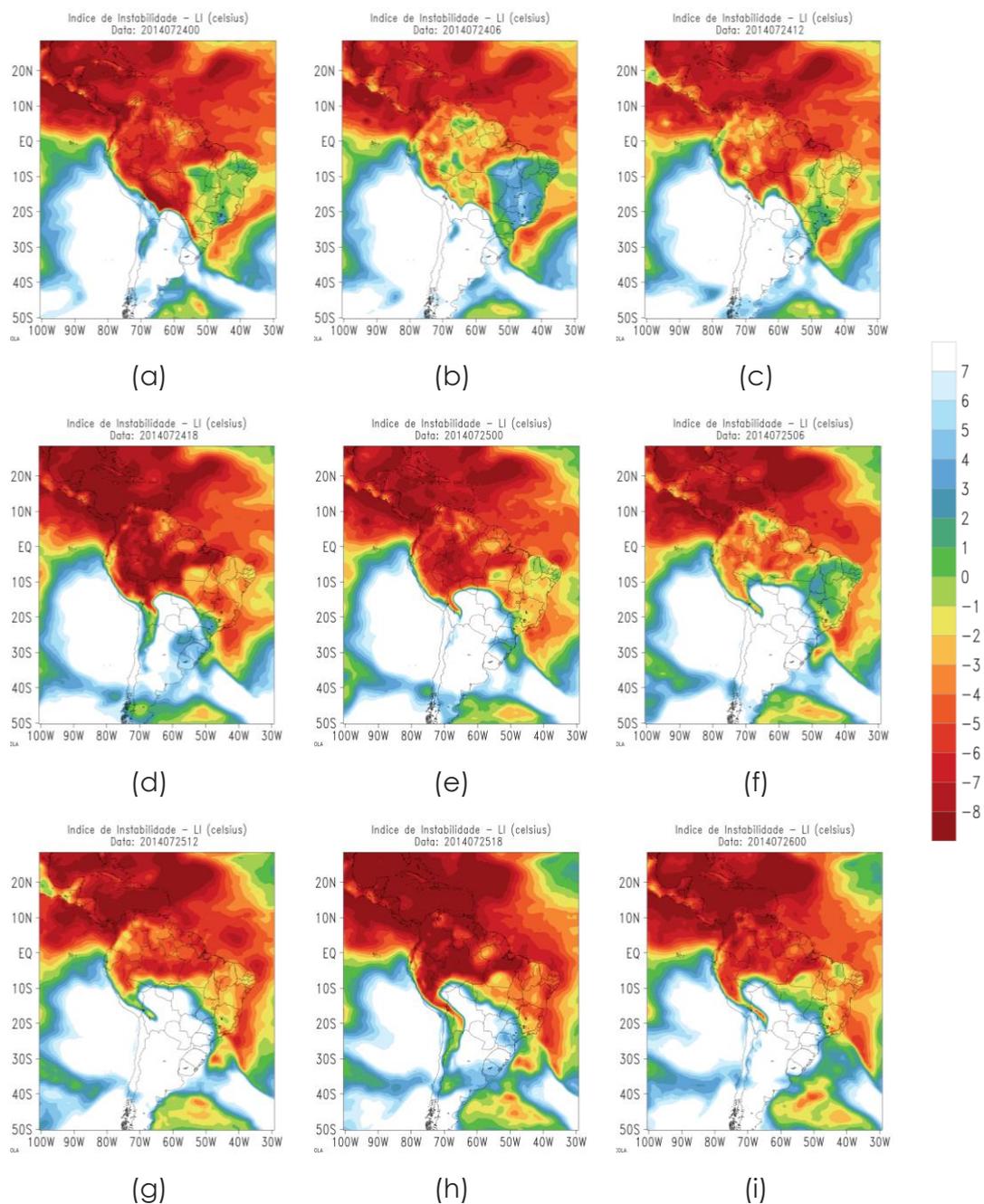


Figura B.16 –Índice de instabilidade LI ($^{\circ}\text{C}$) para o evento ocorrido entre os dias 23 e 27 de julho de 2014 – caso 8. a) 24/07/2014 as 0000 UTC, b) 24/07/2014 as 0600 UTC, c) 24/07/2014 as 1200 UTC, d) 24/07/2014 as 1800 UTC, e) 25/07/2014 as 0000 UTC, f) 25/07/2014 as 0600 UTC, g) 25/07/2014 as 1200 UTC, h) 25/07/2014 as 1800 UTC e i) 26/07/2014 as 0000 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 24 e 25/07/2014.

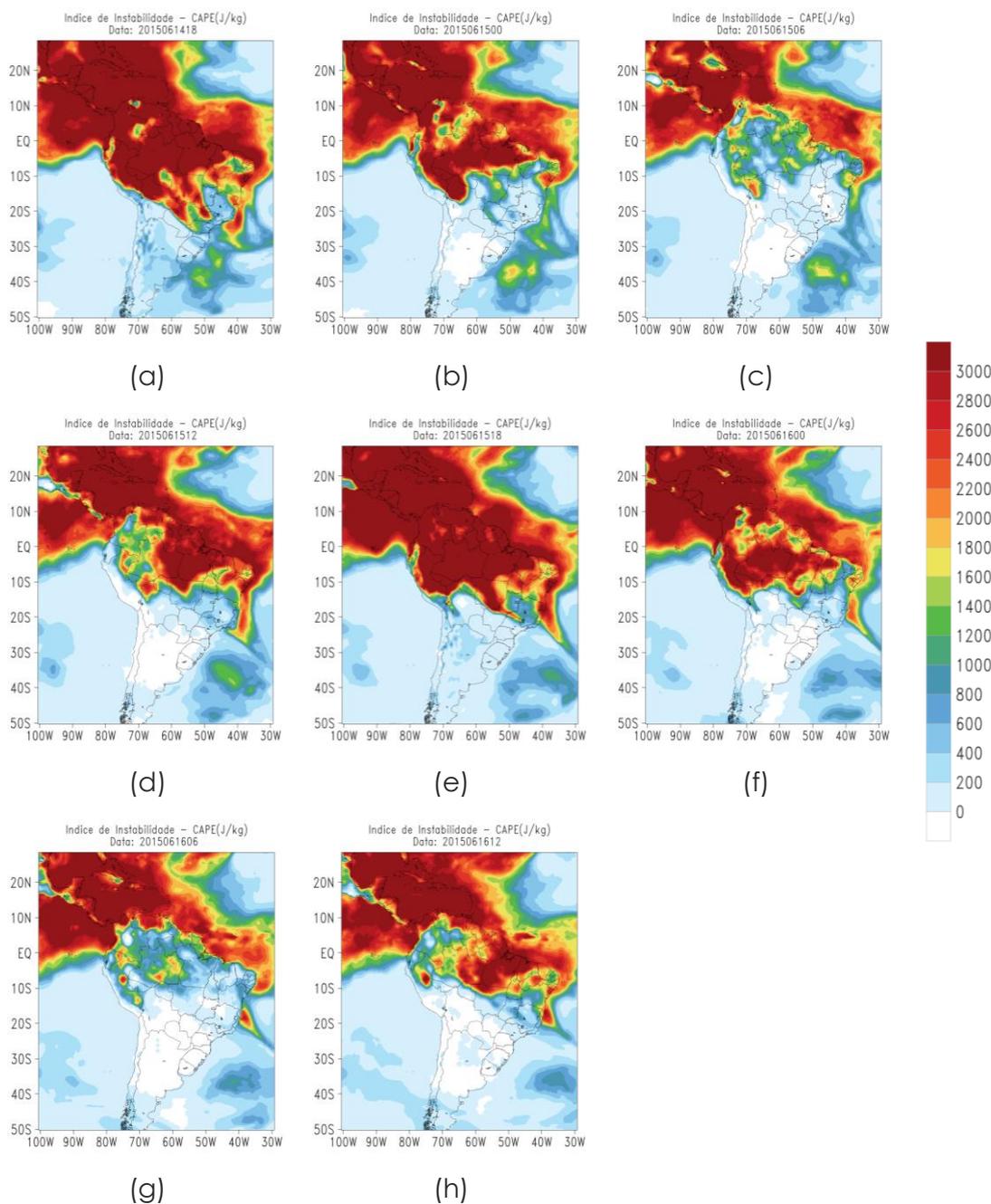


Figura B.17 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 13 e 15 de junho de 2015 – caso 9. a) 14/06/2015 as 1800 UTC, b) 15/06/2015 as 0000 UTC, c) 15/06/2015 as 0600 UTC, d) 15/06/2015 as 1200 UTC, e) 15/06/2015 as 1800 UTC C, f) 16/06/2015 as 0000 UTC, g) 16/06/2015 as 0600 UTC e h) 16/06/2015 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 15 e 16/06/2015.

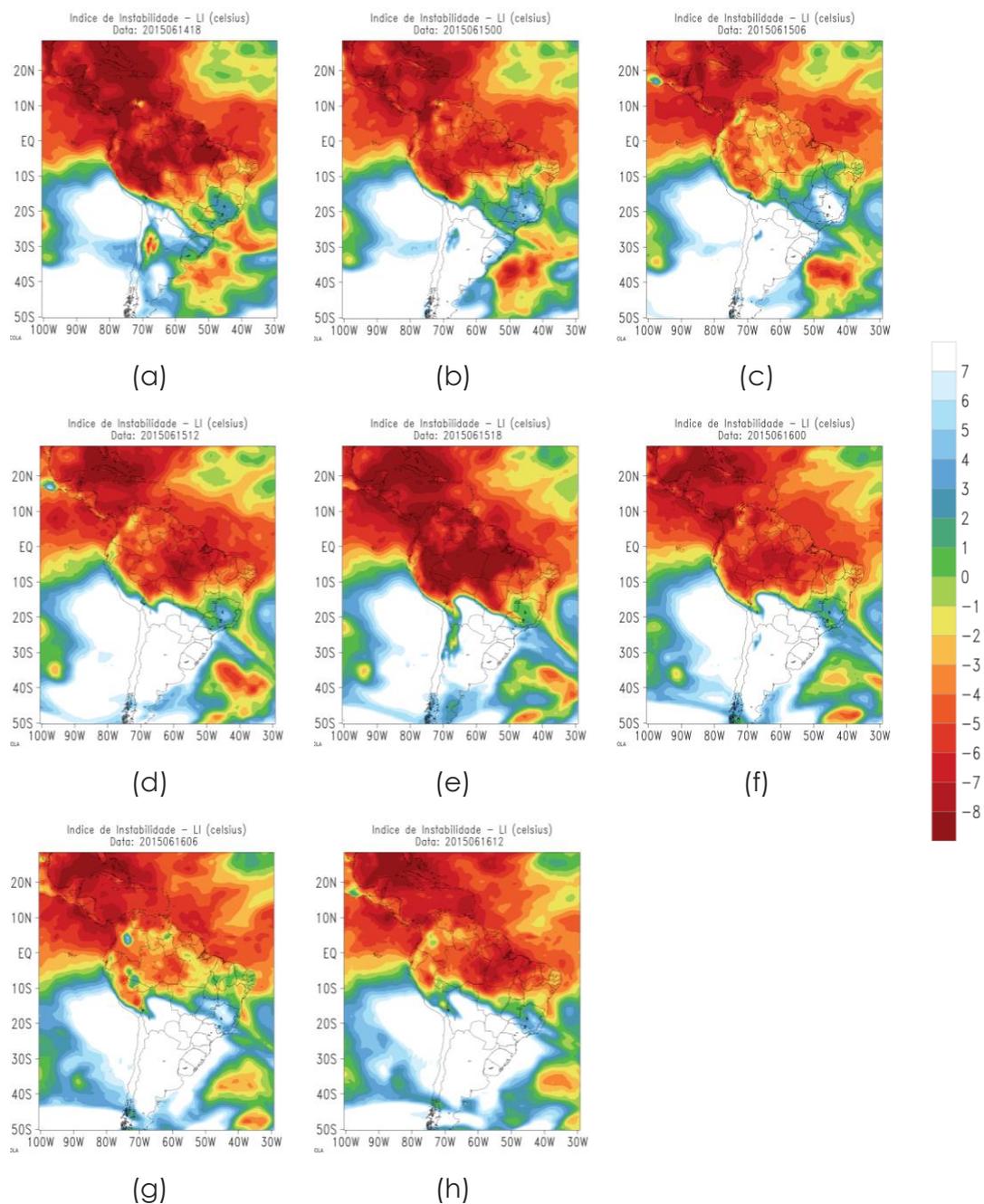


Figura B.18 –Índice de instabilidade LI (°C) para o evento ocorrido entre os dias 13 e 15 de junho de 2015 – caso 9. a) 14/06/2015 as 1800 UTC, b) 15/06/2015 as 0000 UTC, c) 15/06/2015 as 0600 UTC, d) 15/06/2015 as 1200 UTC, e) 15/06/2015 as 1800 UTC C, f) 16/06/2015 as 0000 UTC, g) 16/06/2015 as 0600 UTC e h) 16/06/2015 as 1200 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 15 e 16/06/2015.

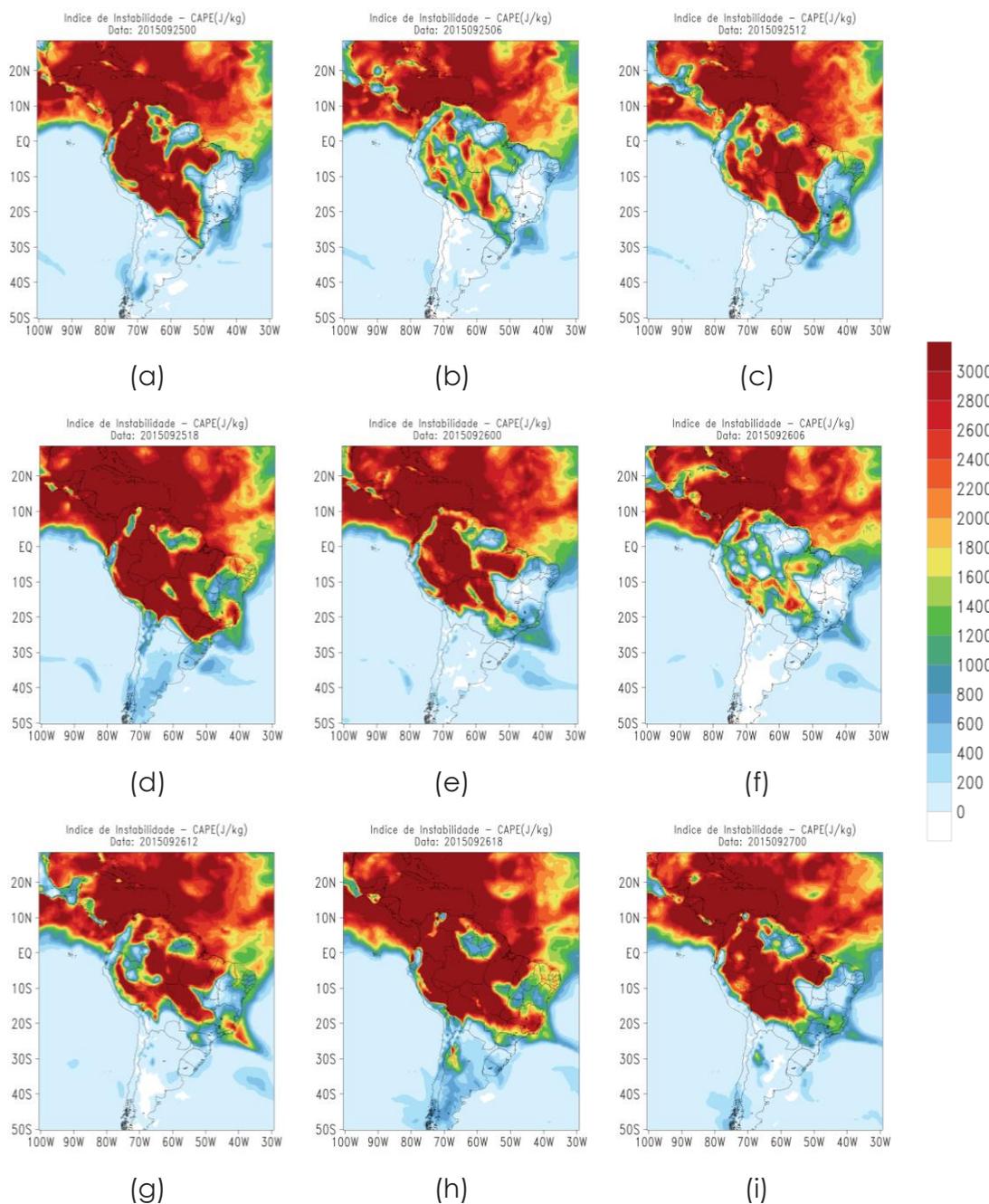


Figura B.19 –Índice de instabilidade CAPE (J/kg) para o evento ocorrido entre os dias 25 e 26 de setembro de 2015 – caso 10. a) 25/09/2015 as 0000 UTC, b) 25/09/2015 as 0600 UTC, c) 25/09/2015 as 1200 UTC, d) 25/09/2015 as 1800 UTC, e) 26/09/2015 as 0000 UTC, f) 26/09/2015 as 0600 UTC, g) 26/09/2015 as 1200 UTC, h) 26/09/2015 as 1800 UTC e i) 27/09/2015 as 0000 UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 25 e 26/09/2015.

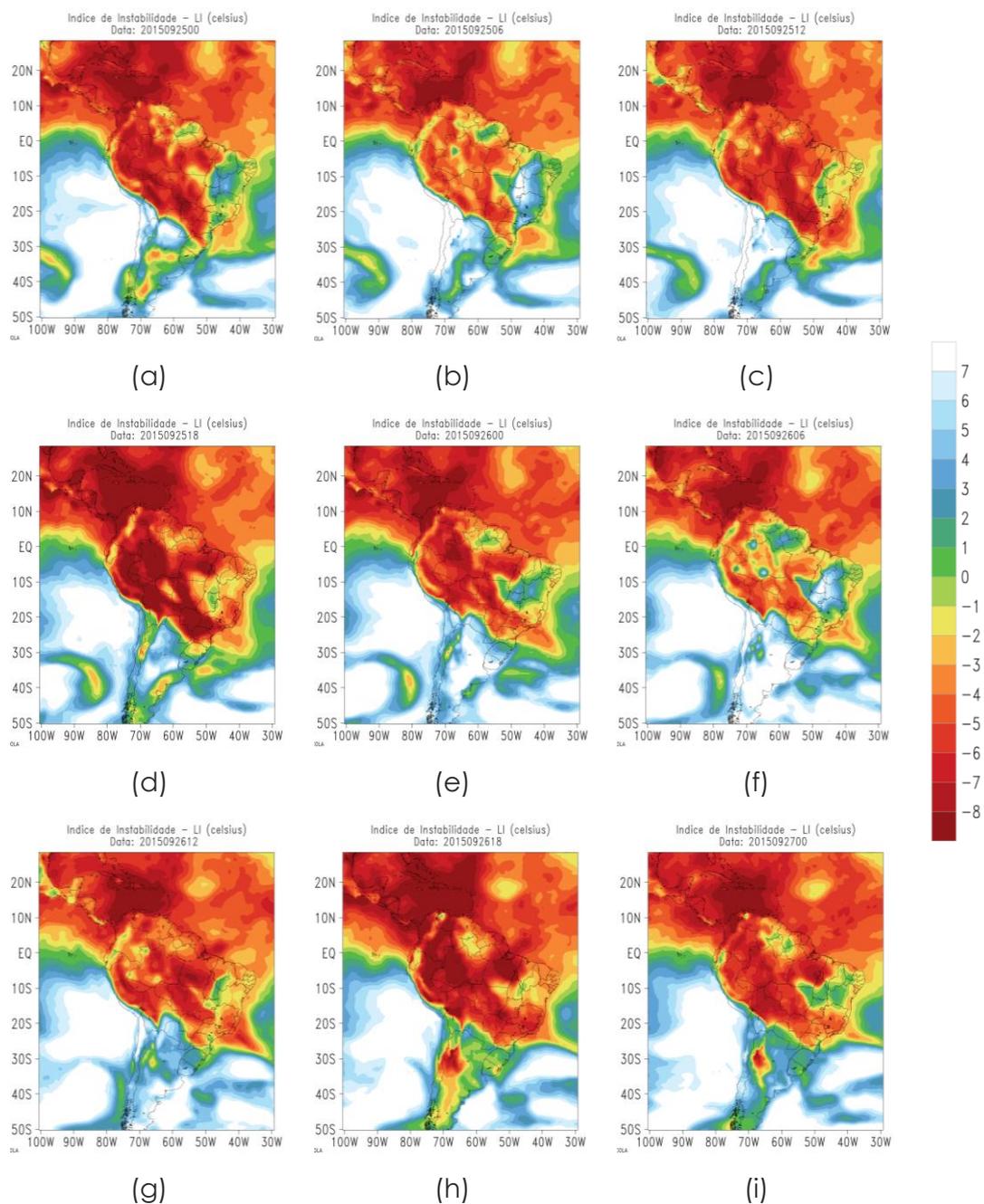


Figura B.20 –Índice de instabilidade LI (°C) para o evento ocorrido entre os dias 25 e 26 de setembro de 2015 – caso 10. a) 25/09/2015 as 0000 UTC, b) 25/09/2015 as 0600 UTC, c) 25/09/2015 as 1200 UTC, d) 25/09/2015 as 1800 UTC, e) 26/09/2015 as 0000 UTC, f) 26/09/2015 as 0600 UTC, g) 26/09/2015 as 1200 UTC, h) 26/09/2015 as 1800 UTC e i) 27/09/2015 as 0000UTC. Índice calculado a partir das reanálises do ERA-Interim. Dias da passagem da frente fria sobre o estado de Santa Catarina: 25 e 26/09/2015.