

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Vinícius de Souza Cebalhos

**USO DE PADRÕES ATMOSFÉRICOS CLIMATOLÓGICOS NA
PREVISÃO DIÁRIA DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO RIO
GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS
2020

Vinícius de Souza Cebalhos

**USO DE PADRÕES ATMOSFÉRICOS CLIMATOLÓGICOS NA PREVISÃO DIÁRIA DE
EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Estudo e aplicação em Tempo e Clima, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia**.

ORIENTADORA: Prof.^a Simone Erotildes Ferraz

COORIENTADOR: Dr. Daniel Caetano Santos

Santa Maria, RS
2020

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Vinícius de Souza Cebalhos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

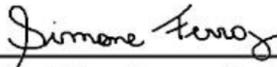
End. Eletr.: vcebalhos@gmail.com

Vinícius de Souza Cebalhos

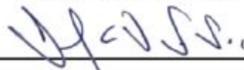
**USO DE PADRÕES ATMOSFÉRICOS CLIMATOLÓGICOS NA PREVISÃO DIÁRIA DE
EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Estudo e aplicação em Tempo e Clima, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia**.

Aprovado em 18 de março de 2020:



Simone Erotildes Ferraz, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)



Daniel Caetano Santos, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



André Becker Nunes, Dr. (UFPel)



Ernani de Lima Nascimento, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por colocar diversas pessoas incríveis em meu caminho que auxiliaram a vencer desafios cada vez mais empolgantes.

A Profª Simone pela orientação, confiança e agilidade nos momentos de dificuldade.

Ao Co-orientador e amigo Daniel, pela disponibilidade e dedicação ao me desafiar a fazer o mestrado.

À Universidade Federal de Santa Maria por disponibilizar ensino de alto nível de forma gratuita.

À secretaria de Pós Graduação em Meteorologia por todo o suporte remoto e pronto atendimento na solução de problemas nos momentos que eu não pude me deslocar até a Universidade.

Aos meus pais, Ary e Vera, por sempre acreditarem em mim e me darem a oportunidade de estudar.

À minha irmã Emília por me apoiar nas dificuldades.

Ao amigo Fuca pelos conselhos e os happy hours quando tudo parecia nebuloso.

À amiga Caroline Bresciani pela ajuda nas disciplinas e pelas horas de descontração no Bar do Pingo.

À Associação dos Professores Universitários de Santa Maria, pela compreensão e permitir que eu dividisse minhas responsabilidades com a associação e o mestrado, em especial ao Presidente Prof. Paulo Roberto Magnago, Prof. Cleber Biazus e Argemiro Coelho pela oportunidade de desenvolvimento profissional e a Mariazinha Cristininha pelo convívio e trocas de conhecimentos na hora do café.

E a todos que de alguma forma me ajudaram e me apoiaram com energias positivas para realizar esta dissertação.

RESUMO

USO DE PADRÕES ATMOSFÉRICOS CLIMATOLÓGICOS NA PREVISÃO DIÁRIA DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: Vinícius de Souza Cebalhos
ORIENTADORA: Simone Erotildes Ferraz
COORDENADOR: Daniel Caetano Santos

Este trabalho tem como objetivo, realizar uma avaliação comparativa quantitativa e qualitativa dos padrões atmosféricos apresentados por Santos (2012) com as saídas de modelos de previsão do tempo, com a finalidade de prever a localização da ocorrência dos eventos de chuvas com uma maior acurácia e utilizar um método de previsão por padrões para prever precipitações extremas sobre o Rio Grande do Sul (RS). Para isso, foram selecionados 3 eventos de precipitação em que houve o acumulado superior a 50 mm em 24 horas. Os dados de previsão obtidos para as comparações com os Padrões de Santos (2012), foram as previsões do modelo GFS (*Global Forecast System*), utilizadas suas saídas diárias dos horários das 12 UTC para 48 horas de previsão. Os dados do GFS foram armazenados desde janeiro de 2017 até junho de 2019, na forma de um banco de dados. As variáveis utilizadas foram pressão ao nível médio do mar, espessura da camada entre 500 hPa e 1000 hPa, altura geopotencial em 500 hPa, componente zonal do vento em 850 hPa, componente meridional do vento em 850 hPa, umidade específica em 850 hPa, temperatura do ar em 850 hPa, componente zonal do vento em 200 hPa e componente meridional do vento em 200 hPa. As simulações obtidas e os padrões de Santos (2012), foram convertidos para matrizes e assim aplicados ao teste de correlação de Pearson para verificar a semelhança quantitativa das simulações do GFS com o 5 Padrões de Santos (2012). O evento 1, registrado no dia 20 de julho de 2018, foi identificado como uma frente fria, associado a uma ciclogênese sobre o Oceano Atlântico e demonstrando maior semelhança com o Padrão 3 de Santos (2012). Quantitativamente também foi identificada semelhança com Padrão 3, observando na pressão o nível médio do mar, variável que apresentou um comportamento mais claro em diferenciar a previsão com os Padrões, correlação no valor de 0,84 na previsão 24 horas antes do evento e 0,854 na previsão de 48 horas antes do evento. O evento 2, registrado no dia 25 de julho de 2018, se deve a um VCAN subtropical, proveniente da quebra do eixo do cavado em 500 hPa. Qualitativamente, este evento tem semelhança com o Padrão 2, porém quantitativamente não foi possível identificar um índice de maior correlação. O evento 3, observado um SCM, com características de um pré frontal com um cavado em 500 hPa sobre os Andes, baixo gradiente de espessura e intensificação da pressão sobre o sudeste do América do Sul, assemelham-se ao Padrão 1 de Santos (2012) no dia 17 de novembro de 2018, apresentou correlação de 0,8412 na simulação 24 horas e 0,783 na simulação 48 horas antes do evento. Apesar do número restrito de casos analisados neste estudo, o reconhecimento mostrou-se satisfatório dos padrões de frente fria e SCM, visto que esses são os principais sistemas precipitantes do RS.

Palavras-chave: Precipitação extrema, Previsão por padrões, Padrões Atmosféricos

ABSTRACT

USE OF CLIMATOLOGICAL WEATHER PATTERNS IN THE DAILY FORECAST OF INTENSE RAINFALL EVENTS IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Vinícius de Souza Cebalhos

ADVISOR: Simone Erotildes Ferraz

CO-ADVISOR: Daniel Caetano Santos

This work aims to carry out a quantitative and qualitative comparative assessment of the atmospheric patterns presented by Santos (2012) with the output of weather forecasting models, in order to predict the location of the occurrence of rain events with greater accuracy. For this, 3 precipitation events were selected in which there was an accumulation greater than 50 mm in 24 hours. The forecast data obtained for comparisons with the Santos (2012) patterns were the GFS (Global Forecast System) forecasts, using their daily departures from 12 UTC to 48 hours of forecast. GFS data was stored from January 2017 to June 2019, in the form of a database. The variables used were pressure at mean sea level, layer thickness between 500 hPa and 1000 hPa, geopotential height at 500 hPa, zonal wind component at 850 hPa, southern wind component at 850 hPa, specific humidity at 850 hPa, temperature air at 850 hPa, zonal wind component at 200 hPa and southern wind component at 200 hPa. The simulations obtained and the Santos (2012) patterns, were converted to matrices and thus applied to Pearson's correlation test, to verify the quantitative similarity of the GFS simulations with the 5 Santos (2012) patterns. Event 1, registered on July 20, 2018, was identified as a cold front, associated with a cyclogenesis over the Atlantic Ocean and showing greater similarity with Santos (2012) Pattern 3. Quantitatively, a similarity with Pattern 3 was also identified, observing the mean sea level in pressure, a variable that showed a clearer behavior in differentiating the forecast with the patterns, a correlation of 0.84 in the forecast 24 hours before the event and 0.854 in forecast 48 hours before the event. Event 2, recorded on July 25, 2018, is due to a subtropical Cyclonic Vortex in High Levels, resulting from the breaking of the excavated axis at 500 hPa. Qualitatively, this event is similar to Pattern 2, but quantitatively it was not possible to identify a higher correlation index. Event 3, observed an mesoscale convective system (MCS), with characteristics of a prefrontal with a 500 hPa dug over the Andes, low thickness gradient and intensification of pressure over southeastern South America, are similar to Santos (2012) pattern 1 on November 17, 2018, showed a correlation of 0.8412 in the 24-hour simulation and 0.783 in the simulation 48 hours before the event. Thus, perhaps to the limited number of cases analyzed in this study, the recognition was satisfactory for the cold front and MCS patterns, since these are the main precipitating systems in Rio Grande do Sul.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3. (...)

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação dos principais sistemas atmosféricos que influenciam a precipitação do RS. Na baixa troposfera: B baixa pressão, BC baixa do Chaco, BNE região de baixas térmicas no noroeste argentino, CCM complexo convectivo de mesoescala, FF frente fria, FQ frente quente, JBN jato de baixos níveis, LIP linhas de instabilidades pré-frontal, NV Núvem vírgula, RC regiões ciclogênicas, ZCAS zona de convergência da Atlântico Sul. Na alta troposfera: AB alta da Bolívia, BL região de bloqueios atmosféricos, JS jato subtropical, JP jato polar, VCAN sub vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais.	13
Figura 3.2 – Modelo conceitual de um conjunto de partículas fonte em um SCM multicelular. As áreas hachuradas representam a refletividade do radar ao longo da seção transversal perpendicular à região convectiva. Os limites da nuvem são indicados pelos contornos. No detalhe é mostrado aproximadamente as escalas e arranjo das maiores partículas fonte relativo ao eco do radar.	14
Figura 4.1 – Distribuição das estações da Agência Nacional das Águas e espacialização das regiões homogêneas de precipitação, para o trimestre SON. ...	17
Figura 4.2 – (A) Padrões atmosféricos conceituais obtidos de cada agrupamento. Estão indicados PNMM (linha azul), fluxo de umidade em 850 hPa (hachurado), eixo do cavado em 500 hPa (tracejado vermelho), o núcleo da corrente de jato em 200 hPa (tracejado preto) e a posição do centro da Circulação Anticiclônica (CA); (B) precipitação acumulada no dia anterior ao registro de evento extremo; (C) precipitação acumulada no dia do evento com características do Padrão 1.	19
Figura 4.3 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 2	20
Figura 4.4 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 3	21
Figura 4.5 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 4	22
Figura 4.6 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 5	23
Figura 4.7 – Acumulados das 24 horas dos dias dos eventos.	24
Figura 4.8 – Mapa com a distribuição das estações automáticas do INMET no RS. ...	25
Figura 4.9 – Domínio utilizado para o cálculo das correlações e os pontos de grade. .	27
Figura 5.1 – Situação sinótica do caso 1: 1ª coluna vento em 200 hPa (hachurado), Altura geopotencial em 500 hPa (linhas), Vento em 200 hPa (vetores); 2ª coluna Pressão ao nível médio do mar (isolinhas), Vento em 850 hPa (Vetores), Fluxo de umidade (hachurado); 3ª coluna Espessura entre 500 hPa e 1000 hPa.	29
Figura 5.2 – Imagem de satélite do canal 13 das 12 UTC do dia 20 de julho de 2018 .	30
Figura 5.3 – Mapas espaciais da pressão ao nível médio do mar da previsão do dia 19 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação para o horário do evento de precipitação (r).	32
Figura 5.4 – Similar à figura 5.3 para a previsão do dia 18 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.	32
Figura 5.5 – Mapas espaciais da altura geopotencial em 500 hPa da previsão do dia 19 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos	

(2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).	33
Figura 5.6 – Similar à figura 5.5 para a previsão do dia 18 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.	33
Figura 5.7 – Situação sinótica do caso 2: 1ª coluna vento em 200 hPa (hachurado), Altura geopotencial em 500 hPa (linhas), Vento em 200 hPa (vetores); 2ª coluna Pressão ao nível médio do mar (isolinhas), Vento em 850 hPa (Vetores), Fluxo de umidade (hachurado); 3ª coluna Espessura entre 500 hPa e 1000 hPa.	35
Figura 5.8 – Imagem de satélite do canal 13 das 12 UTC do dia 25 de julho de 2018 .	37
Figura 5.9 – Mapas espaciais da pressão ao nível médio do mar da previsão do dia 14 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).	38
Figura 5.10 – Similar à figura 5.9 para a previsão do dia 23 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.	38
Figura 5.11 – Mapas espaciais da altura geopotencial em 500 hPa da previsão do dia 24 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).	39
Figura 5.12 – Similar à figura 5.11 para a previsão do dia 23 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.	39
Figura 5.13 – Situação sinótica do caso 3: 1ª coluna vento em 200 hPa (hachurado), Altura geopotencial em 500 hPa (linhas), Vento em 200 hPa (vetores); 2ª coluna Pressão ao nível médio do mar (isolinhas), Vento em 850 hPa (Vetores), Fluxo de umidade (hachurado); 3ª coluna Espessura entre 500 hPa e 1000 hPa.	41
Figura 5.14 – Imagem de satélite do canal 13 das 12 UTC do dia 17 de novembro de 2018	43
Figura 5.15 – Mapas espaciais da pressão ao nível médio do mar da previsão do dia 16 de novembro (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).	44
Figura 5.16 – Similar à figura 5.15 para a previsão do dia 15 de novembro (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.	44
Figura 5.17 – Mapas espaciais da altura geopotencial da previsão do dia 16 de novembro (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).	45
Figura 5.18 – Similar à figura 5.17 para a previsão do dia 15 de novembro (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.	45

LISTA DE TABELAS

- Tabela 5.1 – Tabela com as correlações de Pearson da simulação das 24 horas de todas as variáveis analisadas com o Caso 1. Maiores valores de cada variável com a cor verde e os segundos valores com a cor verde claro. . . 34
- Tabela 5.2 – Similar a tabela 5.1 para a simulação das 48 horas anteriores ao evento. 34
- Tabela 5.3 – Tabela com as correlações de Pearson da simulação das 24 horas de todas as variáveis analisadas com o Caso 2. Maiores valores de cada variável com a cor verde e os segundos valores com a cor verde claro. . . 40
- Tabela 5.4 – Similar a tabela 5.3 para a simulação das 48 horas anteriores ao evento. 40
- Tabela 5.5 – Tabela com as correlações de Pearson da simulação das 24 horas de todas as variáveis analisadas com o Caso 3. Maiores valores de cada variável com a cor verde e os segundos valores com a cor verde claro. . . 46
- Tabela 5.6 – Similar a tabela 5.5 para a simulação das 48 horas anteriores ao evento. 46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CA</i>	Circulação Anticiclônica
<i>CCA</i>	Correlação Canônica
<i>CCM</i>	Complexo Convectivo de Mesoescala
<i>CPTEC</i>	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
<i>CRS – INPE</i>	Centro Regional Sul do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>ESP</i>	Espessura entre 500mb e 1000mb
<i>GFS</i>	Global Forecast System
<i>GPC</i>	Grupo de Pesquisa em Clima
<i>HGT500MB</i>	Altura Geopotencial em 500mb
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>JBNAS</i>	Jato de baixos níveis da América do Sul
<i>NCEP</i>	National Centers for Environmental Prediction
<i>PNMM</i>	Pressão ao nível médio do mar
<i>RS</i>	Rio Grande do Sul
<i>SCM</i>	Sistema Convectivo de Mesoescala
<i>SPFH850MB</i>	Umidade específica em 850mb
<i>TEMP850MB</i>	Temperatura do ar em 850mb
<i>UGRD200MB</i>	Componente zonal do vento em 200mb
<i>UGRD850MB</i>	Componente zonal do vento em 850mb
<i>VCAN</i>	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
<i>VGRD200MB</i>	Componente meridional do vento em 200mb
<i>VGRD850MB</i>	Componente meridional do vento em 850mb
<i>WRF</i>	Weather and Research Forecasting
<i>ZCAS</i>	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	11
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4	MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1	DADOS	16
4.1.1	Padrões de Santos (2012)	16
4.1.2	Casos selecionados para estudo	24
4.1.3	Dados de previsão do GFS	25
4.2	MÉTODOS ESTATÍSTICOS EMPREGADOS	26
4.2.1	Correlação de Pearson	26
5	RESULTADOS	28
5.1	CASO 1	28
5.2	CASO 2	35
5.3	CASO 3	41
6	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

A precipitação é uma importante variável meteorológica que influencia diretamente diversas áreas da sociedade, tanto nas grandes cidades quanto nas áreas rurais. Por exemplo, excesso de chuva num curto período de tempo pode gerar deslizamentos de terra em áreas acidentadas, ou a falta de chuva por períodos maiores podem causar desabastecimento tanto para consumo quanto para geração de energia hidroelétrica (THEIS; HENSE; DAMRATH, 2005; YOUNIS; ANQUETIN; THIELEN, 2008). A previsão do tempo é consultada diariamente para o planejamento das atividades a serem realizadas, tanto no âmbito doméstico quanto no corporativo. A informação mais acessada é se irá chover ou não, e se sim, se serão pancadas esparsas ou um longo período chuvoso; o fato é que ainda não temos a informação precisa de quanto irá chover (FRITSCH et al., 1998).

Estudos mostram que as precipitações intensas geram impactos na saúde da população, com a disseminação de doenças, e danos econômicos com os alagamentos, ocasionando grandes transtornos nas cidades e possíveis perdas de safras, entre outros (MELLER, 2012; CARLTON et al., 2013).

Na previsão do tempo, um dos maiores desafios é realizar uma previsão quantitativa do volume de chuvas, uma vez que esta é a mais questionada, quando o interesse é a previsão de eventos extremos de precipitação. O conhecimento da quantidade esperada de precipitação, que tanto pode ser pelo excesso ou pela falta de chuvas, auxilia na previsão de enchentes, planejamento prévio de plantios, controle de doenças, erosão do solo, danificação de residências e falta de água potável (ALVISI; FRANCHINI; MARINELLI, 2007; SANTOS, 2012).

O Rio Grande do Sul (RS) possui um regime de chuvas bastante uniforme ao longo do ano (SANTOS, 2012), sendo as frentes frias e os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) de grande importância na contribuição e distribuição das chuvas da região (DURKEE; MOTE; SHEPHERD, 2009; REBOITA et al., 2010).

Dada a variedade de sistemas geradores de precipitação, uma previsão do volume de chuvas ainda é imprecisa, mesmo com a maior cobertura de estações de observação e com o aumento da capacidade computacional que possibilita o aumento da resolução de modelos de previsão do tempo (FRITSCH et al., 1998; KALNAY, 2003; FOSS et al., 2002). A informação da quantidade de chuva é de suma importância no planejamento diário da população, pois esta informação pode afetar fortemente a tomada de decisões nas mais diversas áreas da sociedade (FRITSCH et al., 1998; HARNACK et al., 2001; SANTOS, 2012).

2 OBJETIVO

Baseado no descrito acima, este trabalho tem como objetivo, realizar uma comparação quantitativa e qualitativa entre as saídas de modelos de previsão e os padrões atmosféricos para precipitação intensa apresentados por Santos (2012), com a finalidade de prever a localização da ocorrência dos eventos de chuvas com maiores acumulados com uma maior acurácia.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar eventos de precipitação extrema relevantes sobre o RS;
- Avaliar as semelhanças sinóticas e dinâmicas dos dados de modelo com os modelos conceituais de Santos (2012);
- Detectar possíveis medidas estatísticas de semelhança com os modelos conceituais de Santos (2012);
- Estudo de viabilidade da aplicação dos modelos conceituais na determinação das regiões com maiores acumulados de chuva no RS;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A tarefa de prever a precipitação ainda é um desafio nos dias de hoje, mesmo com um maior número de estações de observações *in situ* e disponibilidade de dados de radar e satélites. Essas informações ainda não são utilizadas em sua totalidade nos modelos numéricos a fim de melhorar as condições iniciais das previsões, pois quanto melhor a representação da condição inicial do modelo, menor o erro das simulações (FRITSCH et al., 1998; ROEBBER et al., 2004; THEIS; HENSE; DAMRATH, 2005).

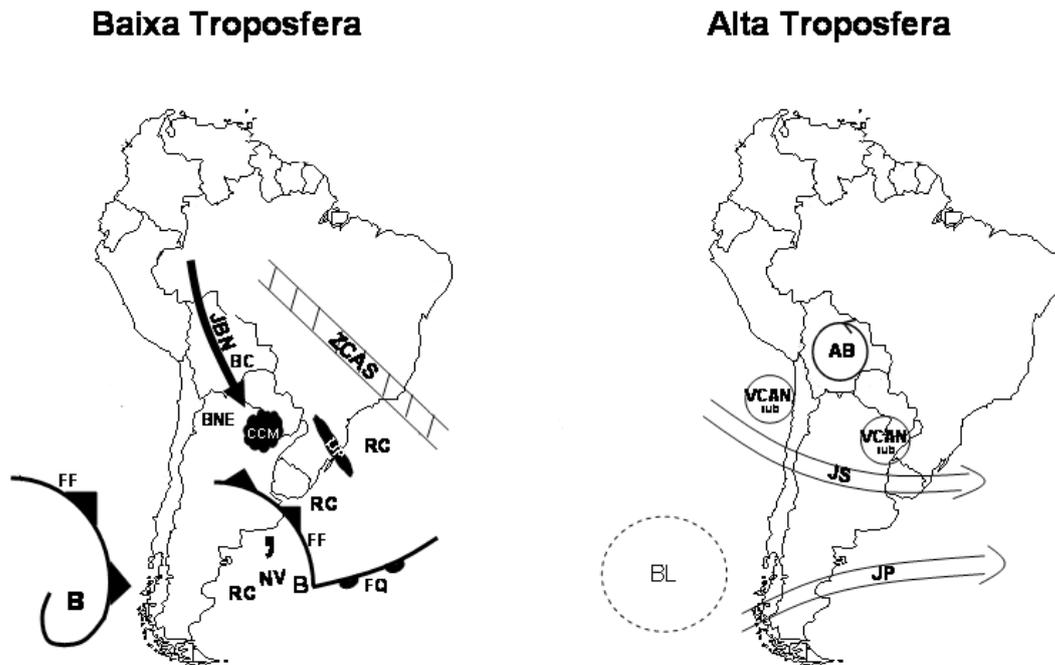
Conforme já mencionado na introdução, o RS tem chuvas bem distribuídas durante o ano (DURKEE; MOTE; SHEPHERD, 2009; REBOITA et al., 2010). Segundo Reboita et al. (2010) os acumulados pluviométricos ficam entre 1050 a 1750 mm/ano, e com totais ainda maiores na região Oeste, na fronteira com o Paraguai chegando a 1750 à 2100 mm/ano. Os principais sistemas responsáveis por gerar os acumulados pluviométricos (Figura 3.1) são ciclones e frentes frias, que se desenvolvem próximos ao Sul do Brasil, em função da presença de vórtices ciclônicos ou cavados em altos e médios níveis sobre a costa oeste da América do Sul, vindos do Pacífico e também devido a condições frontogenéticas e ciclogênicas originadas nesta região.

Os sistemas frontais, influenciam o tempo sobre a América do Sul durante todo o ano, principalmente no Sul do Brasil (ANDRADE, 2005). O ramo frio é o setor mais atuante do sistema frontal no Sul do Brasil, que é facilmente identificado em imagens de satélite e geralmente se desloca de sudeste para nordeste (OLIVEIRA, 1986). Durante o inverno, esses sistemas frontais são acompanhados de intensas massas de ar polar, que muitas vezes causam geadas em áreas agrícolas no Sul do país. Nas estações de verão, as frentes frias frequentemente se posicionam ao longo da costa do Brasil, entre São Paulo e Bahia, na região climatológica da Zona de Convergência do Atlântico do Sul (ZCAS), originando períodos prolongados de chuva, algumas vezes com ocorrência de inundações e prejuízos materiais na região (CAVALCANTI et al., 2009).

Já os SCMs, segundo Houze Jr (2004), são sistemas de nebulosidade que se formam pelo agrupamento de várias tempestades convectivas e produzem uma área contínua de precipitação com dimensões igual ou superior a 100 km em pelo menos uma direção (Figura 3.2). Diversos tipos de organização convectiva satisfazem essa definição, como por exemplo os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM).

O conceito de CCM foi criado por Maddox (1980), baseando-se no tamanho, forma e o tempo de vida do evento. Segundo Maddox, um CCM deve possuir uma cobertura de nuvens cujo topo apresentam temperaturas de brilho no infravermelho menores que -32°C e com área de pelo menos 100.000 km^2 , e a região central da nuvem com temperatura inferior a -52°C e com área de pelo menos 50.000 km^2 . Além disso, devem possuir uma forma circular com excentricidade maior que 0,7. Quanto à duração, esta deve ser superior

Figura 3.1 – Representação dos principais sistemas atmosféricos que influenciam a precipitação do RS. Na baixa troposfera: **B** baixa pressão, **BC** baixa do Chaco, **BNE** região de baixas térmicas no noroeste argentino, **CCM** complexo convectivo de mesoescala, **FF** frente fria, **FQ** frente quente, **JBN** jato de baixos níveis, **LIP** linhas de instabilidades pré-frontal, **NV** Nuvem vírgula, **RC** regiões ciclogenéticas, **ZCAS** zona de convergência da Atlântico Sul. Na alta troposfera: **AB** alta da Bolívia, **BL** região de bloqueios atmosféricos, **JS** jato subtropical, **JP** jato polar, **VCAN sub** vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais.



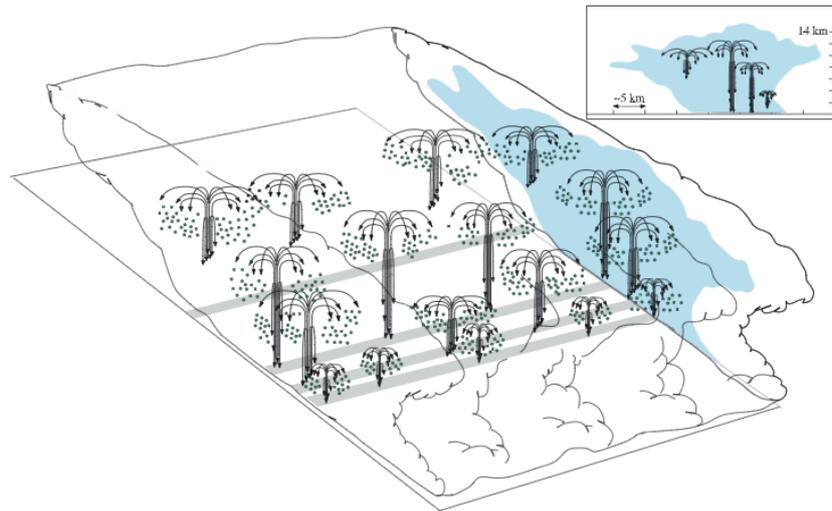
Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2010)

a 6 horas. Os SCM's tem uma grande contribuição no acumulado de chuvas sobre o sudeste da América do Sul, causando anomalias superiores a 30% sobre o nordeste da Argentina e Sul do Paraguai no mês de dezembro (DURKEE; MOTE; SHEPHERD, 2009)

A oferta de umidade para alimentar os sistemas de precipitação no Sul do Brasil dar-se-á, principalmente, por meio do Jato de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS) que é um importante componente do sistema de monção na América do Sul, transportando umidade da bacia Amazônica para a bacia Paraná-Prata, influenciando o tempo e clima do RS (CAVALCANTI et al., 2009) . Este, é caracterizado por um vento intenso de norte com máxima velocidade em torno dos 2.000m de altura e comumente observado no lado leste de grandes montanhas e é associado a movimentos de grande escala (BONNER, 1968; MARENGO et al., 2004).

Os modelos numéricos de previsão do tempo estão em constante evolução e este

Figura 3.2 – Modelo conceitual de um conjunto de partículas fonte em um SCM multi-celular. As áreas hachuradas representam a refletividade do radar ao longo da seção transversal perpendicular à região convectiva. Os limites da nuvem são indicados pelos contornos. No detalhe é mostrado aproximadamente as escalas e arranjo das maiores partículas fonte relativo ao eco do radar.



Fonte: Houze Jr (2004)

avanço é permitido graças a melhor descrição dos processos físicos da atmosfera e também pelo avanço computacional que permite o aumento da resolução espacial para a solução das equações com uma melhor simulação dos sistemas sinóticos e subsinóticos (ROEBBER et al., 2004). Ainda assim, limitações computacionais fazem com que técnicas estatísticas em dados de menor resolução apresentem desempenho similar à simulações mais refinadas (KALNAY, 2003; FOSS et al., 2002; SANTOS, 2015). Com o aumento da resolução dos modelos de previsão, há uma melhor representação do desenvolvimento e estrutura dos eventos de mesoescala, porém não necessariamente há um aumento da acurácia do modelo da previsão (ROEBBER et al., 2004; MASS et al., 2002; THEIS; HENSE; DAMRATH, 2005; CLARK et al., 2010), pois estes costumam apresentar erros na previsão do momento e o local da precipitação, gerando uma grande diferença entre a previsão e o observado (MASS et al., 2002).

Com a finalidade de melhorar a previsão de curto tempo, Fritsch et al. (1998) estudou as previsões quantitativas de precipitação para os Estados Unidos, analisando a física básica das chuvas torrenciais, os efeitos dos processos sinóticos e a influência da superfície. Seu estudo mostrou que as chuvas torrenciais na estação quente têm uma baixa acurácia em função destes eventos serem gerados por processos convectivos de menor escala, que não são resolvidos na escala dos modelos numéricos, além de salientar uma relação muito forte entre a capacidade de previsão do modelo e a habilidade do previsor (FRITSCH et al., 1998).

Roebber et al. (2004) apresentam uma revisão e comparação entre as vantagens e desvantagens no uso das simulações de alta resolução em comparação ao uso de técnicas estatísticas, tais como a média das simulações, análise de agrupamento e espalhamento, em simulações menos refinadas. E reforça o estudo da física da convecção a fim de refinar os processos de parametrização dos modelos de alta resolução, sendo esse processo necessário para descrever sistemas com dimensões inferiores ao tamanho da grade do modelo e também sistemas de pequena escala que não registrados pelas estações de observação, utilizadas na inicialização das simulações numéricas.

Como uma alternativa para contornar estes problemas de previsibilidade e sendo uma das ferramentas de previsão do tempo ainda pouco utilizadas, a previsão por padrões consiste na identificação de similaridades com eventos passados conhecidos que favoreceram ou foram precursores da ocorrência de um determinado fenômeno. Esta técnica é comumente utilizada em diversas áreas da meteorologia, por exemplo, para a previsão do fenômeno El Niño e La Niña (CARDOSO, 2005), previsão de anos de seca ou chuvosos na região semiárida do Brasil analisando a precipitação da pré-estação (MELO et al., 1997), na gestão hídrica, utilizando padrões de consumo de uma rede de distribuição de água potável (ALVISI; FRANCHINI; MARINELLI, 2007) e previsão de cheias dos rios, com o objetivo de emitir alertas para inundações (MELLER, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme relatado na revisão bibliográfica, ainda há poucos estudos sobre a previsão por padrões em escala sinótica.

Ainda na fase de idealização deste trabalho, o ideia inicial era gerar uma ferramenta operacional que comparasse as saídas do modelo GFS (*Global Forecast System*) com os padrões identificados por Santos (2012). Assim, o primeiro objetivo foi construir uma arquitetura para que todo esse processo fosse gerado automaticamente, desde o download dos dados de previsão, realizada as devidas comparações com os Padrões e os dados de precipitação das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), esta para verificar se o evento era de precipitação expressiva para o estudo.

O primeiro passo, foi o início do banco de dados com as previsões do GFS. A operacionalização começou no início de 2018, baixando as simulações das 00Z e das 12Z com 72 horas de previsão. Após o início deste processo, começou a ser incorporado novos passos, sendo incluído o download dos dados do INMET para a comparação posterior da ocorrência do evento.

Com esses passos já consolidados e definido uma ferramenta estatística para quantificação da semelhança entre previsão e os Padrões de Santos (2012), esta operacionalização começou a realizar esta comparação diariamente, tanto para os dados das 00Z como para às 12Z.

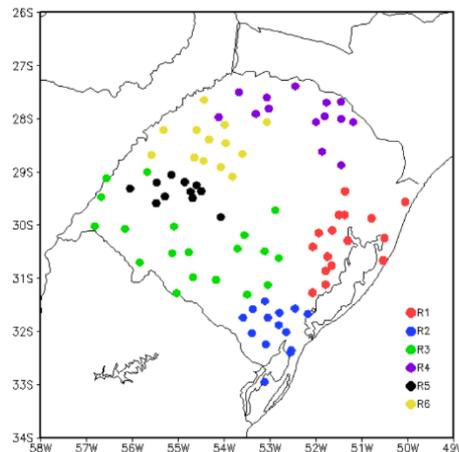
Assim, visando a comparação quantitativa e qualitativa do uso dos padrões atmosféricos apresentados por Santos (2012) e as saídas operacionais do modelo de circulação geral da atmosfera GFS, abaixo será detalhado os dados e métodos utilizados:

4.1 DADOS

4.1.1 Padrões de Santos (2012)

Santos (2012) definiu os principais padrões sinóticos que causam ou favorecem um elevado acumulado diário regional de precipitação. Para tal, identificou 6 regiões homogêneas com comportamento de precipitação semelhante nas primaveras entre os anos de 1980 e 2006 (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Distribuição das estações da Agência Nacional das Águas e espacialização das regiões homogêneas de precipitação, para o trimestre SON.



Fonte: Santos (2012)

Os padrões obtidos por Santos (2012) indicam as seguintes configurações atmosféricas encontradas na ocorrência de eventos extremos de precipitação. O Padrão 1 (Figura 4.2A) possui características de uma possível condição pré-frontal, com uma forte advecção de temperatura em 850 hPa e o posicionamento do núcleo de jato em 200 hPa ao sul do RS, no dia antecedente ao evento extremo, dia -1, apresentando pouca precipitação no extremo sul, em parte da fronteira com o Uruguai e regiões isoladas no centro do estado (Figura 4.2B). Nos dias de evento extremo, dia 0, esta configuração foi responsável pelos maiores acumulados de precipitação nas regiões R2, R3, R5 e R6 (Figura 4.2C).

No Padrão 2, a formação de um centro de baixa pressão sobre o Oceano Atlântico próximo ao litoral norte do RS e o posicionamento do núcleo de jato sobre o estado foram suas principais características (Figura 4.3A), no dia -1, há registro de precipitação em parte da fronteira com o Uruguai, centro e norte do estado (Figura 4.3B), já os extremos de precipitação concentram-se sobre a região R1 (Figura 4.3C). O Padrão 3 apresenta a formação de um ciclone extratropical em superfície ao sul do RS, advecção forte de temperatura em 850 hPa e o posicionamento do jato em 200 hPa, com características de uma possível incursão frontal (Figura 4.4A). No dia -1 as precipitações registradas foram na fronteira com o Uruguai, centro-oeste e sul do estado, já os extremos de precipitação se concentraram sobre as regiões R1, R2, R3, R4 e R5 (Figura 4.4C).

O Padrão 4 está associado a uma configuração característica da ocorrência de SCM, com queda da pressão em superfície e forte advecção de temperatura sobre todo o RS (Figura 4.5A). No dia -1 precipitação na fronteira com o Uruguai, estendendo-se até a fronteira com a Argentina (Figura 4.5B) e os extremos de precipitação ocorreram em todas as regiões (Figura 4.5C). E finalmente, no Padrão 5, assim como no Padrão 4, há queda

na pressão em superfície, advecção de temperatura em 850 hPa e a proximidade do jato em 200 hPa (Figura 4.6A), o que ocasionou extremos de precipitação nas regiões R2, R3 e R4 (Figura 4.6C).

Figura 4.2 – (A) Padrões atmosféricos conceituais obtidos de cada agrupamento. Estão indicados PNMM (linha azul), fluxo de umidade em 850 hPa (hachurado), eixo do cavado em 500 hPa (tracejado vermelho), o núcleo da corrente de jato em 200 hPa (tracejado preto) e a posição do centro da Circulação Anticiclônica (CA); (B) precipitação acumulada no dia anterior ao registro de evento extremo; (C) precipitação acumulada no dia do evento com características do Padrão 1.

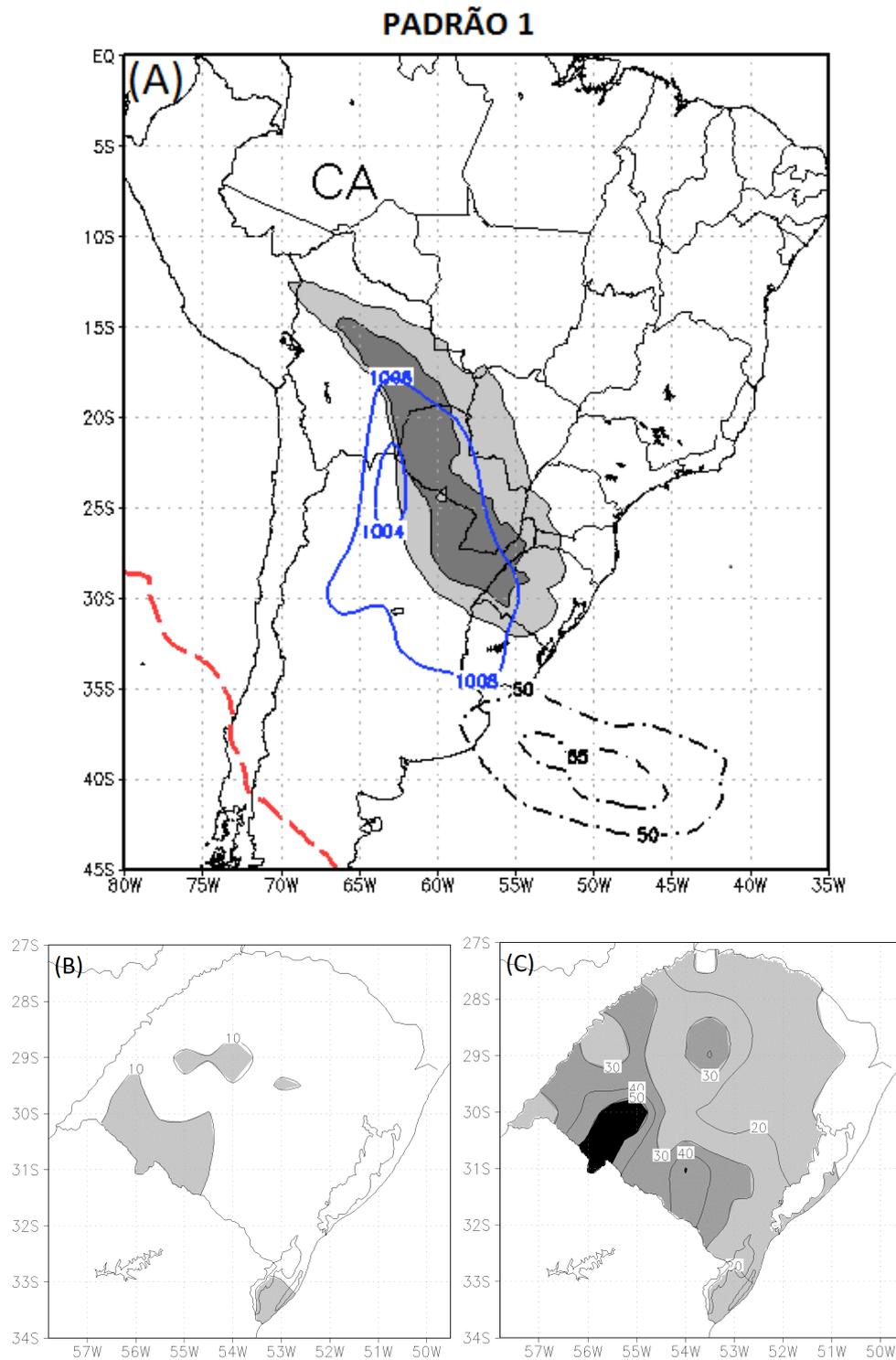
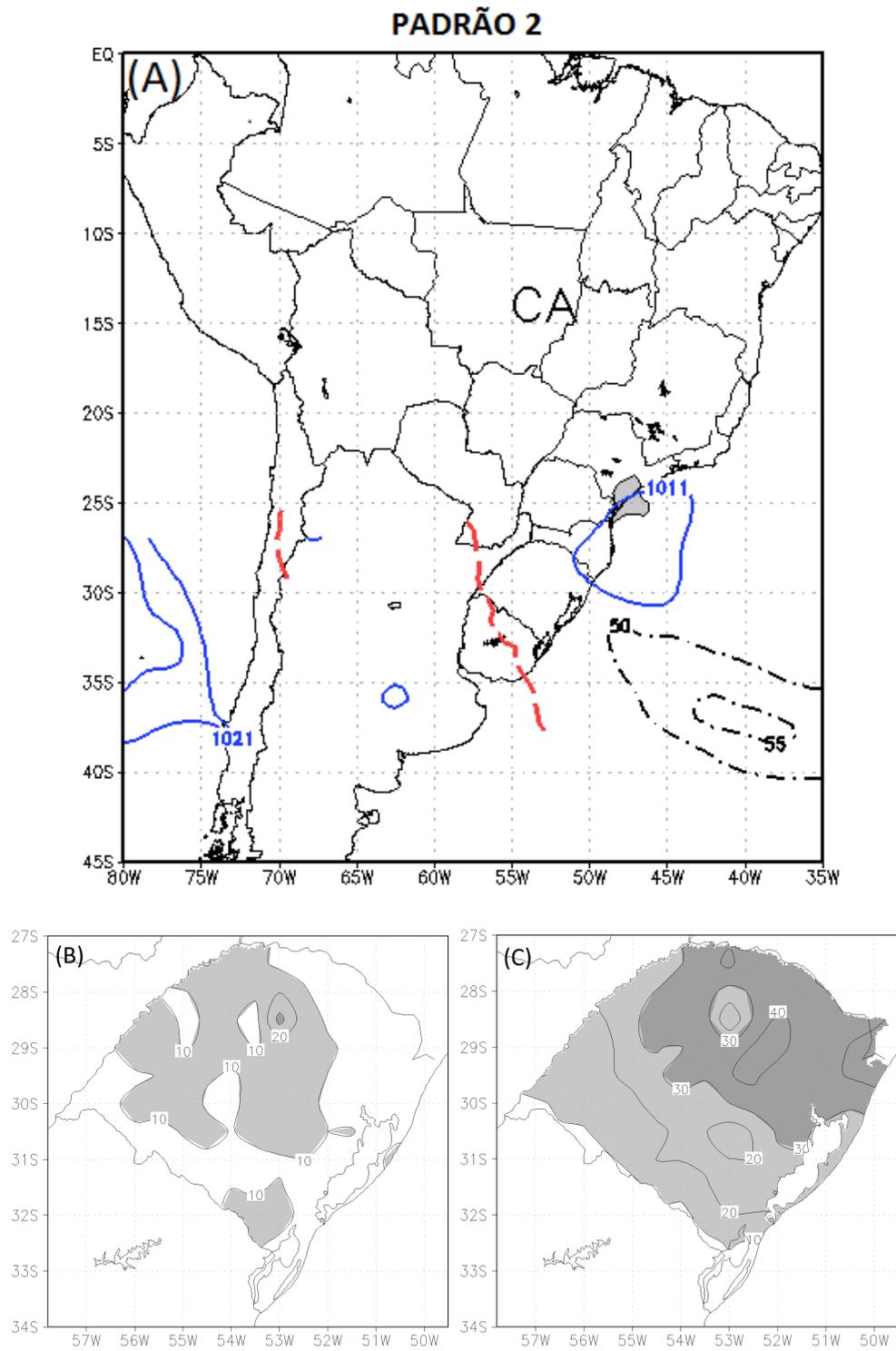
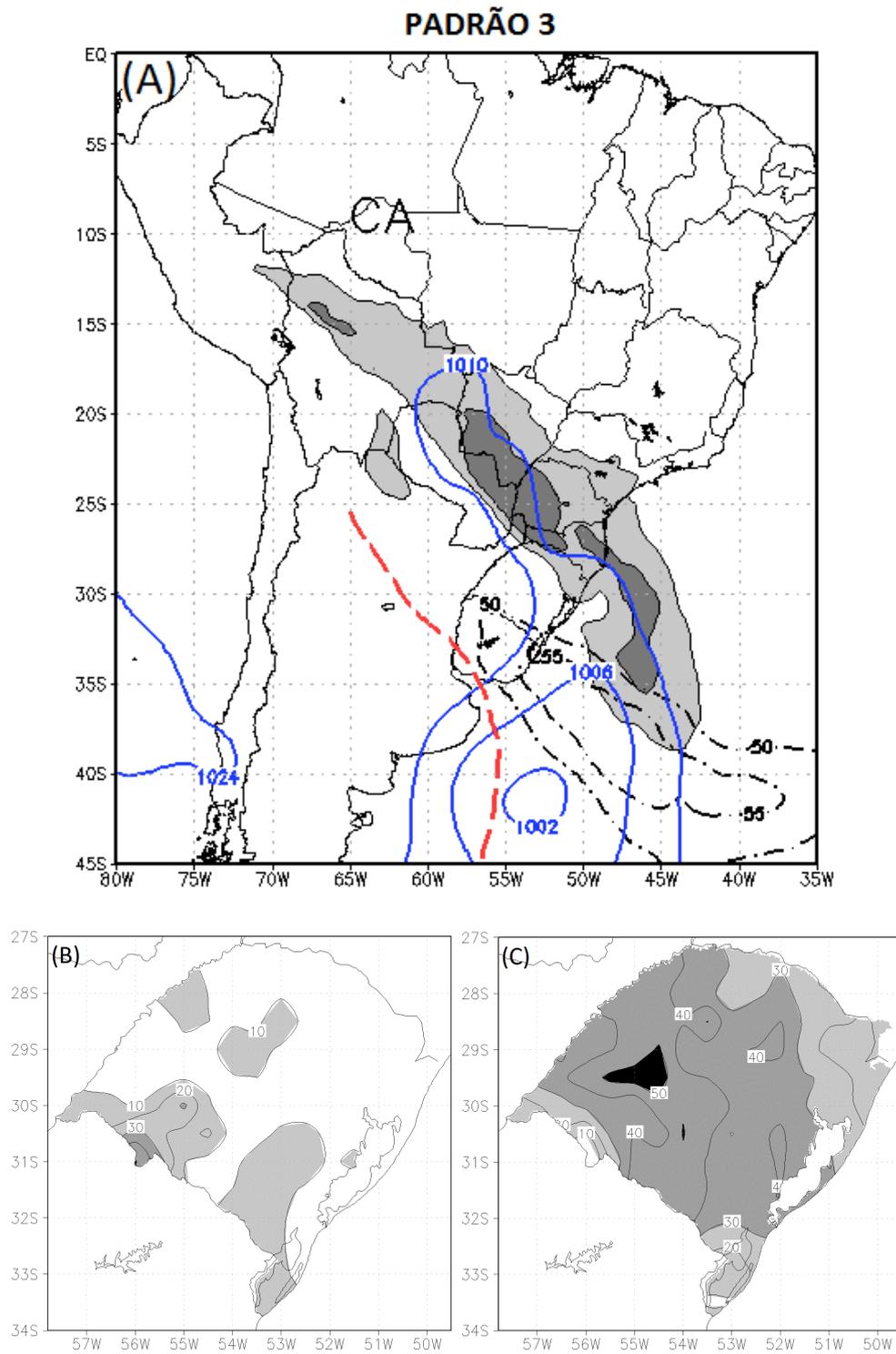


Figura 4.3 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 2



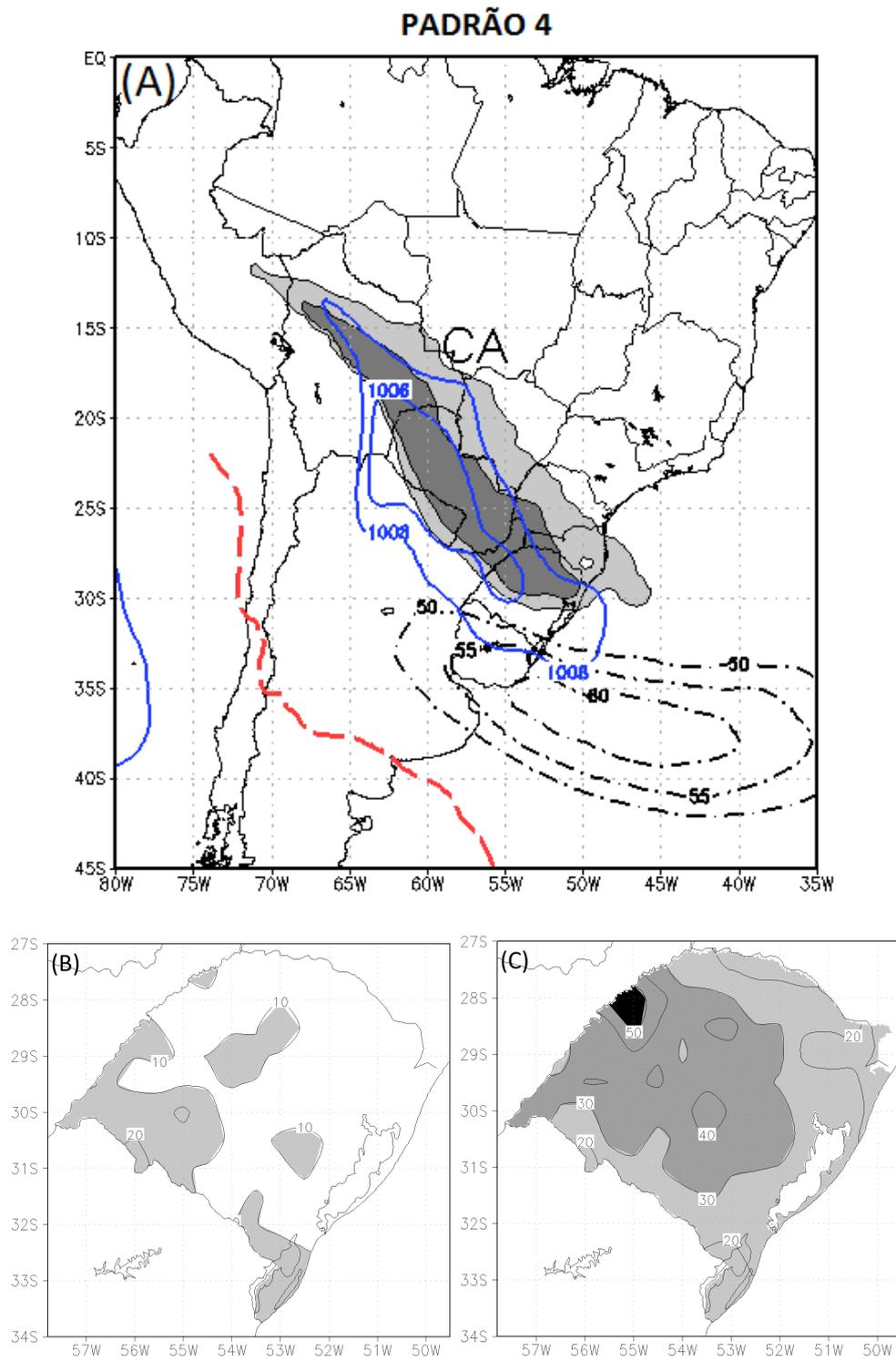
Fonte: Adaptado de Santos (2012)

Figura 4.4 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 3



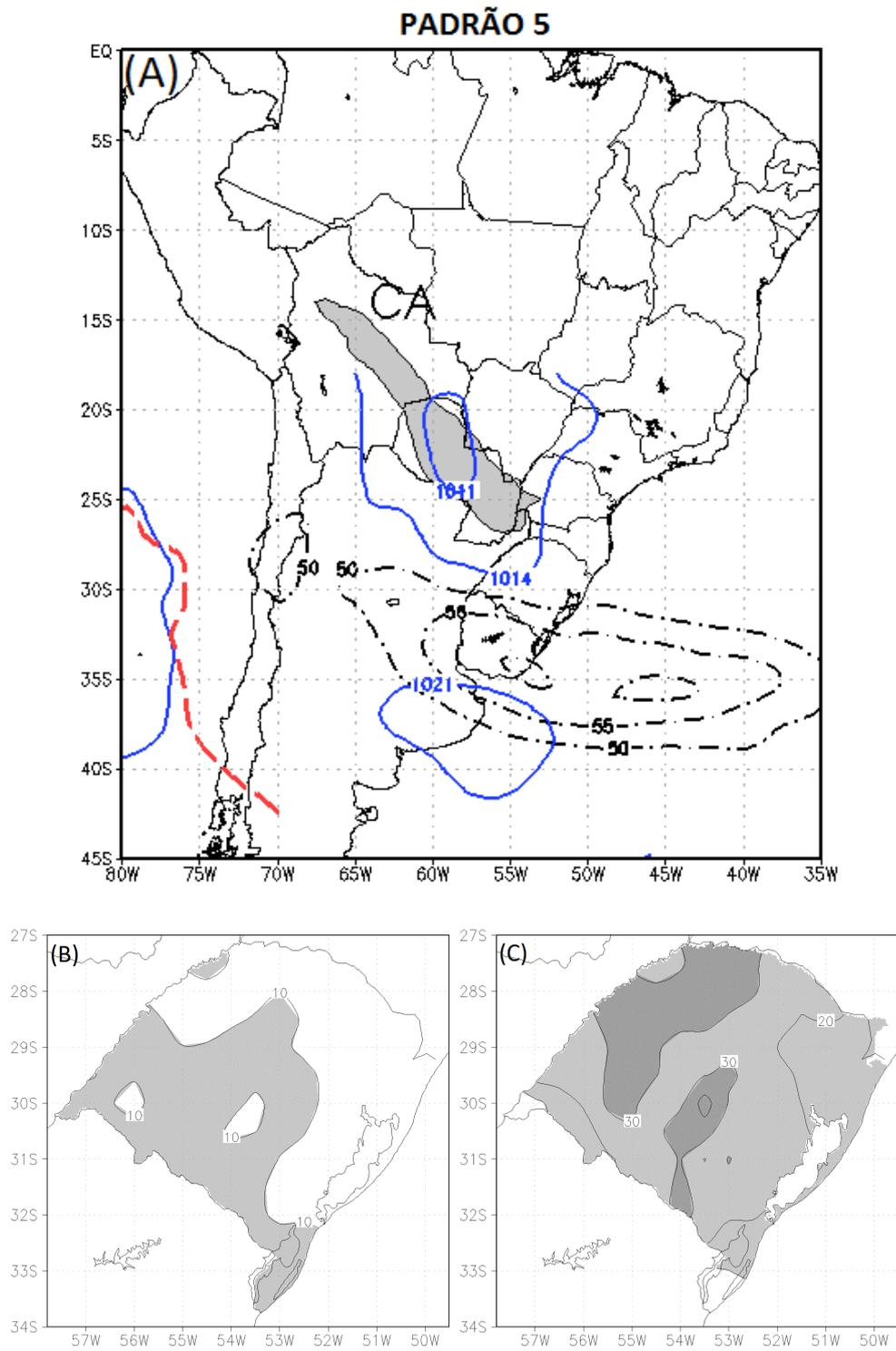
Fonte: Adaptado de Santos (2012)

Figura 4.5 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 4



Fonte: Adaptado de Santos (2012)

Figura 4.6 – Idêntico à 4.2 para o Padrão 5



Fonte: Adaptado de Santos (2012)

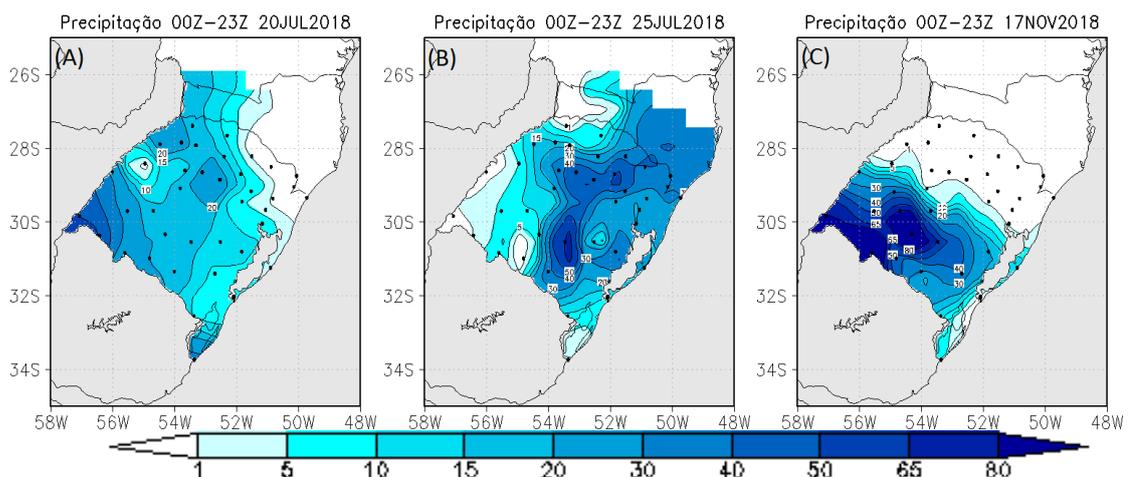
4.1.2 Casos selecionados para estudo

Para a execução deste trabalho foram selecionados casos que apresentaram acumulados significativos sobre o RS. Em um primeiro momento foi consultado o relatório dos casos significativos do mês, elaborado mensalmente pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudo Climáticos (CPTEC), no qual é relatado um evento no dia 20 de julho de 2018 (Figura 4.7A), cuja a precipitação registrada na cidade Uruguaiana foi de 50 mm e outro evento, na mesma semana, no dia 25 de julho (Figura 4.7B), em que houve registro de elevada precipitação acumulada. Ambos os casos ocorreram no inverno, o que determinará a viabilidade de usar os Padrões encontrados para a primavera por Santos (2012) em outras estações do ano. Após as comparações já estarem trabalhando em modo operacional, começou-se a comparar com eventos que foram observados durante o estudo. Assim sendo identificado o evento de precipitação do dia 17 de novembro de 2018, registrando precipitação de 121,2 mm (Figura 4.7C), na primavera. A análise sinótica de cada evento é descrita nos resultados.

Os critérios para a seleção foram precipitações volumosas, superiores a 50 mm dentro de 24 horas, que ocorreram durante o estudo e que contemplassem diferentes características sinóticas.

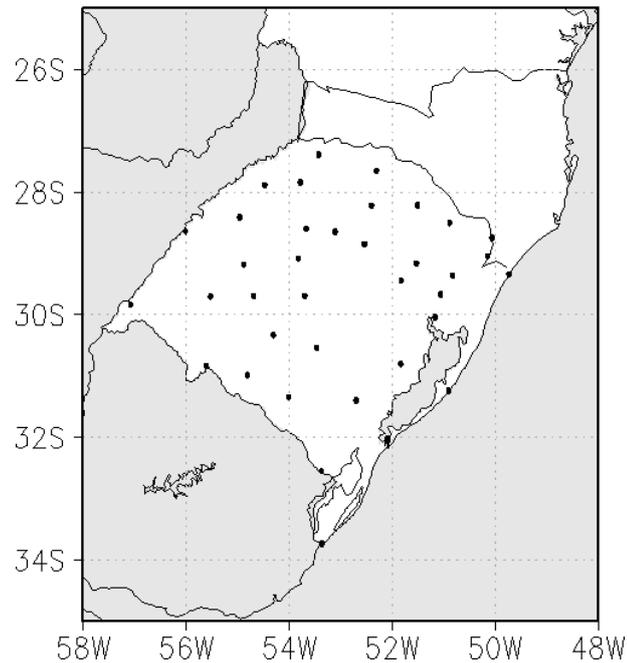
Os registros de precipitação utilizados para a seleção dos casos, foram os dados das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) obtidas no website “<http://www.inmet.gov.br>”. Essas estações fazem registros a cada hora e o RS possui um total de 43 estações, com suas localizações demonstradas na figura 4.8.

Figura 4.7 – Acumulados das 24 horas dos dias dos eventos.



Fonte: INMET

Figura 4.8 – Mapa com a distribuição das estações automáticas do INMET no RS.



Fonte: INMET

4.1.3 Dados de previsão do GFS

O modelo de previsão utilizado neste trabalho é o *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e consiste no acoplamento de quatro modelos separados, sendo um atmosférico, um oceânico, um de solo e um de gelo marinho, que trabalham em conjunto para fornecer previsões com maior acurácia das condições meteorológicas. O seu domínio é global, com grade de 0,5° de resolução e 31 níveis verticais.

Foram utilizadas as saídas diárias dos horários das 12 UTC para 48 horas de previsão. Os dados das previsões do GFS foram armazenados desde janeiro de 2017 até junho de 2019, na forma de um banco de dados.

As variáveis utilizadas para a comparação:

- Pressão ao nível médio do mar (PNMM);
- Espessura da camada entre 500 hPa e 1000 hPa (ESP);
- Altura geopotencial em 500 hPa (HGT500MB);
- Componente zonal do vento em 850 hPa (UGRD850MB);

- Componente meridional do vento em 850 hPa (VGRD500MB);
- Umidade específica em 850 hPa (PFH850MB);
- Temperatura do ar em 850 hPa (TEMP850MB);
- Componente zonal do vento em 200 hPa (UGRD200MB);
- Componente meridional do vento em 200 hPa (VGRD200MB);

4.2 MÉTODOS ESTATÍSTICOS EMPREGADOS

Para realizar a comparação quantitativa dos dados do GFS com os padrões identificados por Santos (2012), é necessário utilizar uma ferramenta estatística que possa extrair informações dos dados de previsão e obter uma medida de semelhança entre os dados e assim, identificando com qual cenário a previsão mais se aproxima, podendo identificar quais as potenciais regiões com previsão de precipitação elevada.

Para este fim, os dados dos padrões de Santos (2012) e os dados de previsão do GFS, foram convertidos para matrizes, para que fosse aplicado o método estatístico, que é apresentado a seguir.

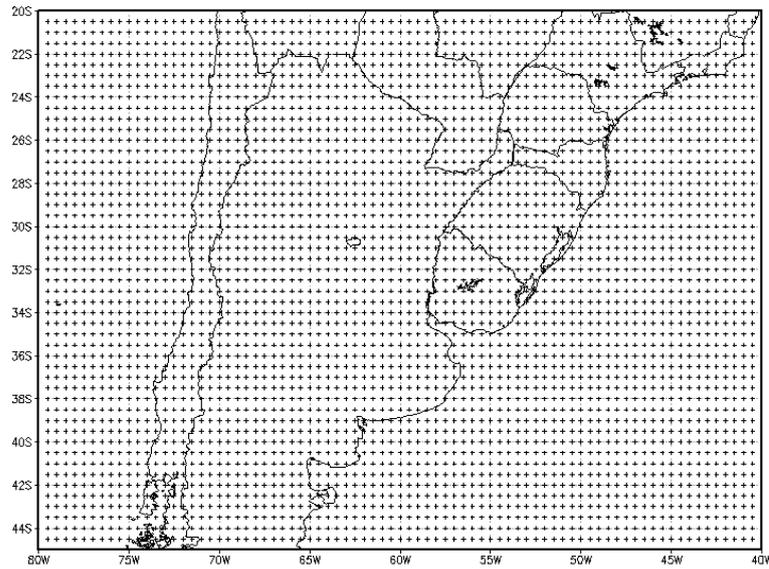
Além disso, como os padrões de Santos (2012) e os campos meteorológicos gerados pelo GFS estavam desalinhados, a grade do GFS foi remapeada para coincidir com os Padrões. Após os dois conjuntos de dados estarem na mesma grade, foi calculado o coeficiente de correlação ponto a ponto. O domínio utilizado (Figura 4.9) para a comparação entre os padrões e a previsão do GFS é entre as latitudes 45°S-20°S (Y) e longitudes 80°W-40°W (X). Assim, possuindo 81 pontos em X e 51 pontos em Y, totalizando 4131 pontos de grade. Esta área (Figura 4.9) foi escolhida por abranger os principais sistemas que atuam na região do estudo e restringe regiões mais ao Norte para não influenciar nos resultados.

Identificado o dia do evento, utilizou-se a simulação das previsões das 24 e 48 horas anteriores ao evento.

4.2.1 Correlação de Pearson

Para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, entre os Padrões de Santos (2012) e a previsão do GFS, foi utilizado o software estatístico R, disponibilizado em <http://www.r-project.org/>. Neste software, a correlação de Pearson é o método padrão no cálculo de correlação.

Figura 4.9 – Domínio utilizado para o cálculo das correlações e os pontos de grade.



Fonte: Próprio autor

Os valores da correlação (r) variam de -1 a 1, sendo que quanto mais próximos a 1, a previsão tem correlação positiva como Padrão, para $r = 0$, a previsão não tem relação linear com o Padrão e quando $r = -1$, a simulação tem correlação negativa, ou seja, tem relação inversa.

$$r = \frac{\sum_{x=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{x=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{x=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

5 RESULTADOS

O período de dados do GFS obtidos, foi de dezembro de 2017 à maio de 2019. Os casos escolhidos foram 2 relatados nos casos significativos pelo CPTEC, com elevado acumulado de chuva e 1 evento acompanhado durante a realização deste trabalho e que apresentou precipitação acumulada superior a 50 mm. Com os acumulados obtidos das estações automáticas, verificou-se, se de fato, essas precipitações apresentavam acumulados elevados.

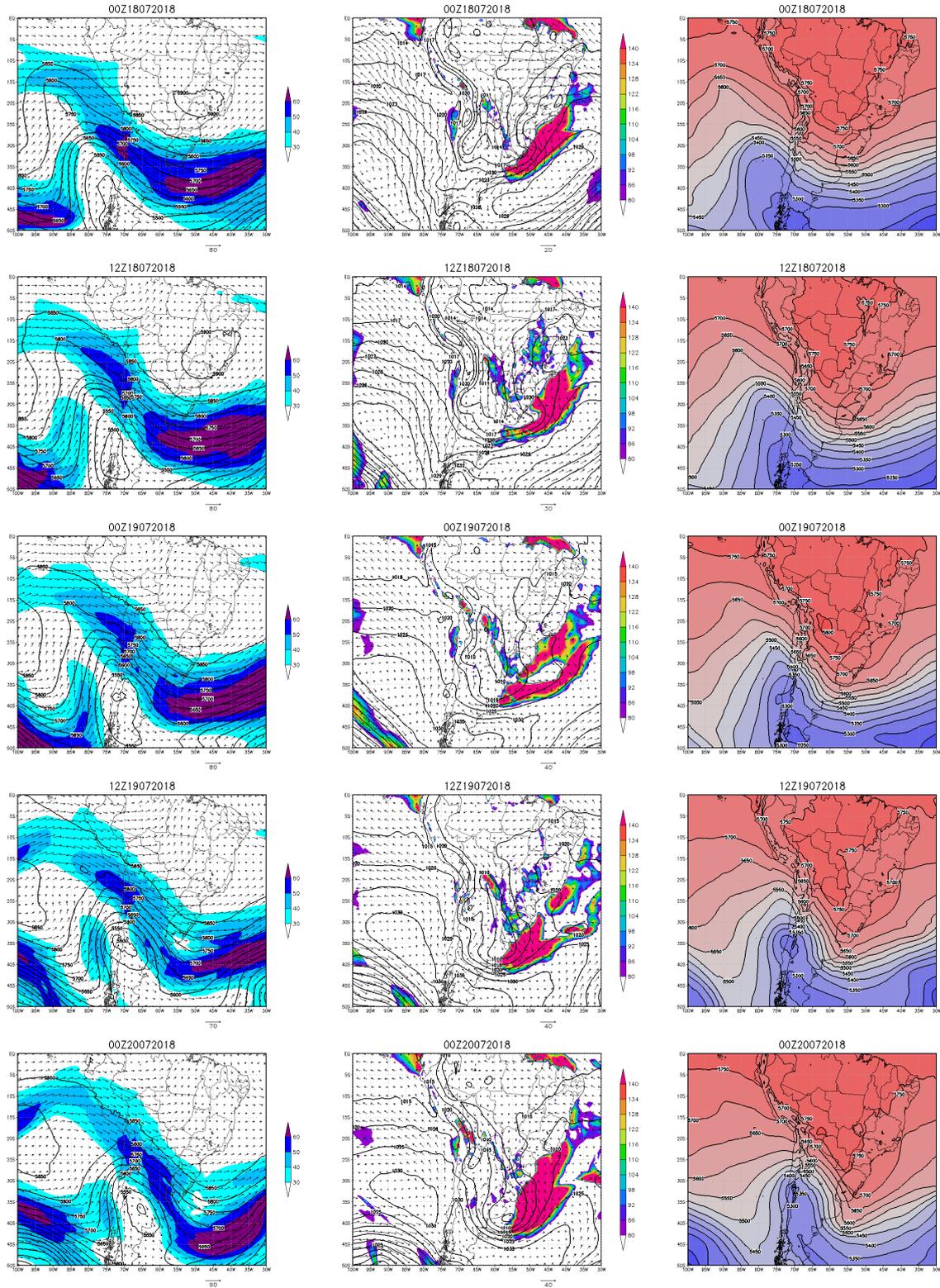
Para a descrição da condição sinótica dos casos estudados neste trabalho, foi analisado os dados da análise, ou seja, a condição inicial do modelo GFS para às 00 e 12 UTC do dia do evento e dos dois dias que antecedem os casos. E para a análise de correlação, foram consideradas as previsões iniciadas 24 e 48 horas antecedentes aos eventos.

Abaixo a descrição dos resultados obtidos neste trabalho.

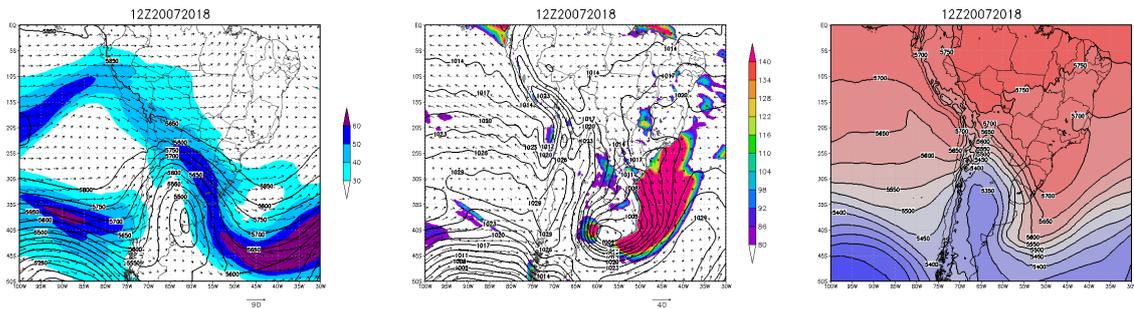
5.1 CASO 1

No caso 1 (Figura 5.1), ocorrido entre os dias 19 e 20 de julho de 2018, teve como característica em altos níveis a presença de jato subtropical, passando pelo centro da Argentina e um jato polar transiente aproximando-se pelo Sul do Uruguai e Oceano Atlântico, entre os dias 18 e 19 de julho. Em médios níveis, um cavado cruza a cadeia de montanhas dos Andes com um núcleo mais frio aproximando-se do centro da Argentina, ao longo do dia 20 de julho. Em superfície se observa a queda de pressão a partir do Norte/Nordeste da Argentina e no Paraguai, no dia 18 de julho, estendendo-se sobre o RS pelo Oeste e sobre o Uruguai nos dias 19 e 20 de julho. No decorrer do dia 20 é possível identificar a ciclogênese com intenso abastecimento de umidade em baixos níveis, nas proximidades da foz do Rio da Prata. No campo de espessura entre 500 e 1000 hPa é possível observar uma elevação dos valores sobre o RS, caracterizando uma condição pré frontal, seguido da intensificação do gradiente ao longo do dia, durante a passagem da frente fria sobre o estado. A imagem de satélite das 12 UTC do dia 20 de julho (Figura 5.2) demonstram as assinaturas de uma incursão frontal sobre o RS.

Figura 5.1 – Situação sinótica do caso 1: 1ª coluna vento em 200 hPa (hachurado), Altura geopotencial em 500 hPa (linhas), Vento em 200 hPa (vetores); 2ª coluna Pressão ao nível médio do mar (isolinhas), Vento em 850 hPa (Vetores), Fluxo de umidade (hachurado); 3ª coluna Espessura entre 500 hPa e 1000 hPa.

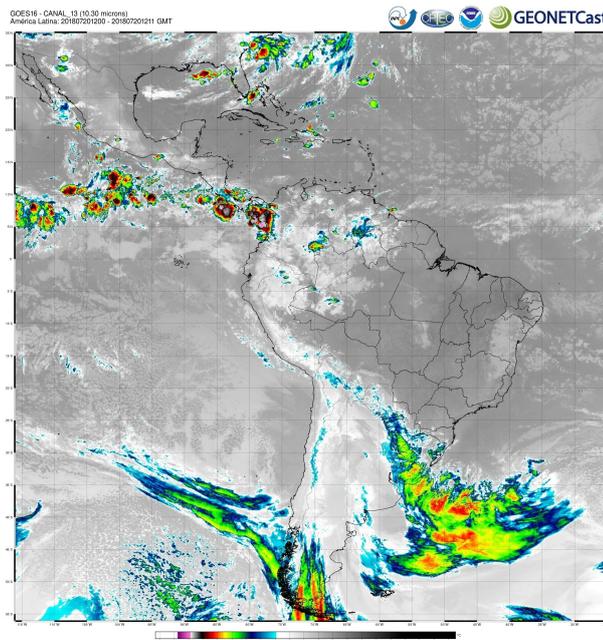


(continuação)



Fonte: Próprio autor

Figura 5.2 – Imagem de satélite do canal 13 das 12 UTC do dia 20 de julho de 2018 .



Fonte: CPTEC

Quando comparado aos modelos conceituais de Santos (2012), é possível notar uma semelhança ao Padrão 3 (Figura 4.2A), com ciclogênese sobre o Oceano, na altura do Uruguai, cavado frontal em médios níveis, presença do Jato em altos níveis e um intenso abastecimento de umidade na baixa troposfera. No comportamento da precipitação (Figura 4.7), assim como em Santos (2012) na figura 4.2C, os maiores acumulados ocorrem sobre Oeste e fronteira com o Uruguai.

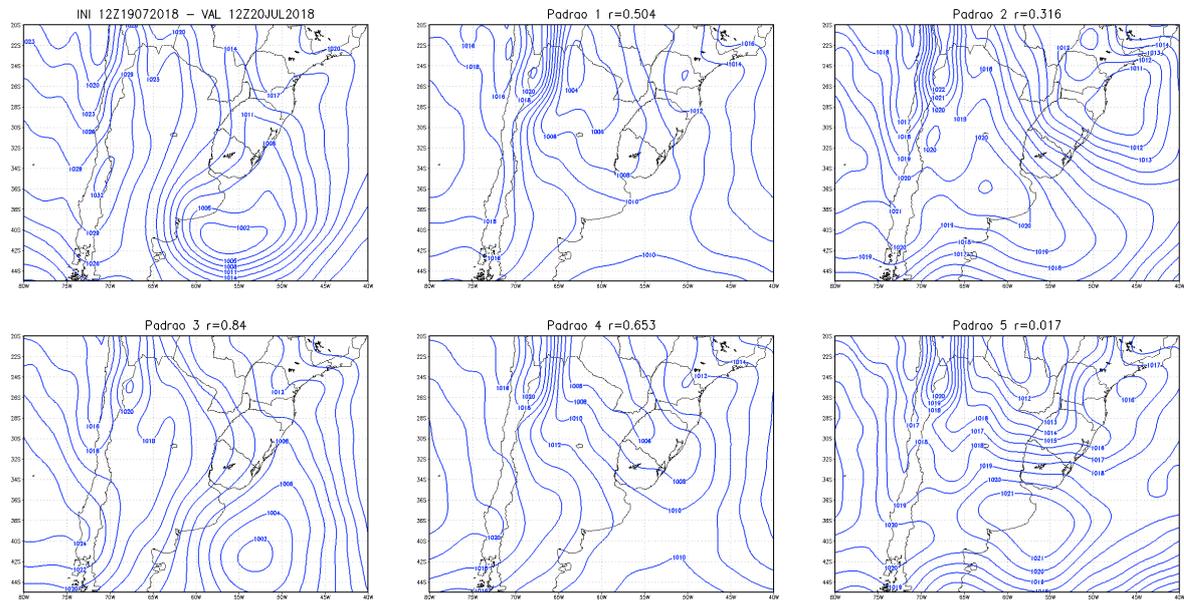
Apesar de qualitativamente haver uma boa concordância entre a condição sinótica do evento e o Padrão de Santos (2012), uma medida quantitativa da previsão do modelo

GFS em comparação aos Padrões de Santos (2012) foi obtida por meio da correlação de Pearson para as 11 variáveis previstas pelo modelo GFS, citadas no capítulo 4 (4.1.3) e que serão apresentadas nas figuras 5.3 à 5.6.

A figura 5.3 mostra a correlação para a previsão de 24 horas antes do evento e nesta integração (iniciada 12 UTC de 19 de julho de 2018) os valores de correlação apresentam maior destaque para o padrão 3 ($r=0,84$), o que condiz com a análise do evento e comparação com o Padrão de Santos (2012), este comportamento também é observado na simulação iniciada 48 horas anteriores ao evento (12UTC do dia 18 de julho de 2018 - Figura 5.4) para o mesmo horário.

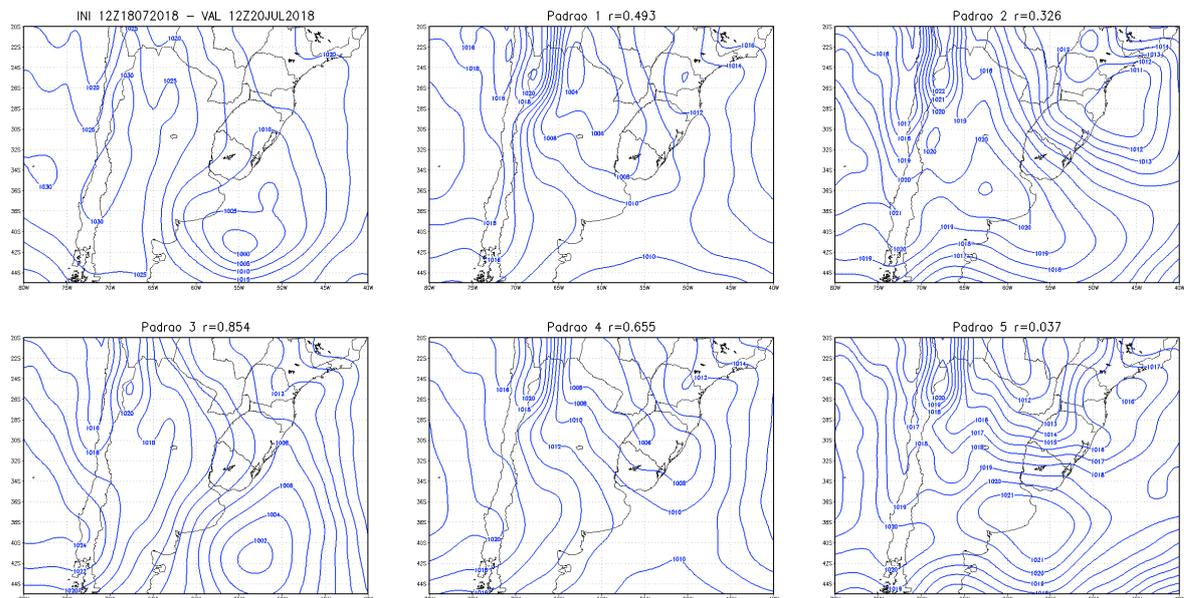
Analisando as tabelas 5.1 e 5.2, as maiores correlações foram no Padrão 3 e mostrando que para esse evento o método apresenta bem a análise. Apesar de ter um bom desempenho em identificar e salientar os padrões que se assemelham, a correlação para algumas variáveis não mostraram-se com esta sensibilidade, como a altura geopotencial em 500hPa em que pode-se ver os elevados valores, quando comparadas as previsões do GFS com todos os padrões, com diferenças muito sutis.

Figura 5.3 – Mapas espaciais da pressão ao nível médio do mar da previsão do dia 19 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação para o horário do evento de precipitação (r).



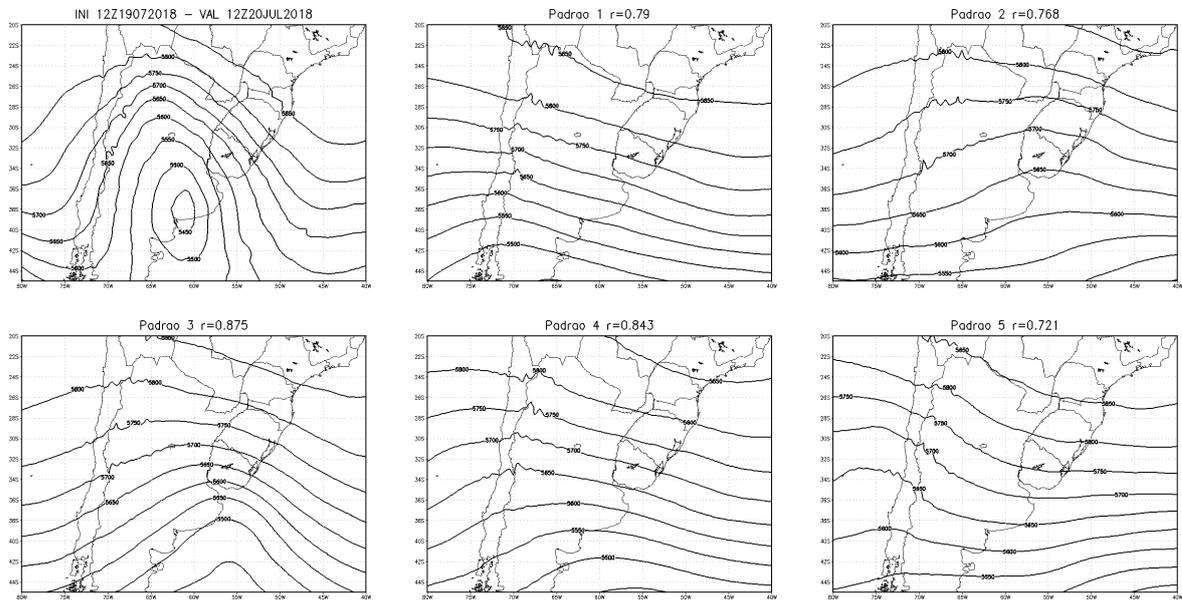
Fonte: Próprio autor

Figura 5.4 – Similar à figura 5.3 para a previsão do dia 18 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.



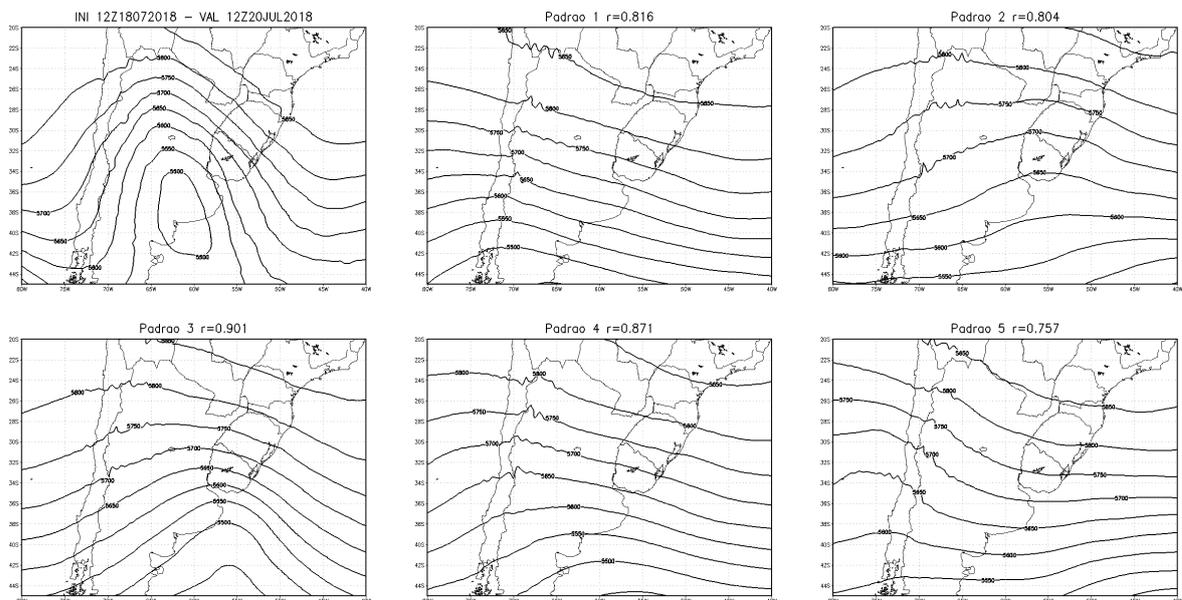
Fonte: Próprio autor

Figura 5.5 – Mapas espaciais da altura geopotencial em 500 hPa da previsão do dia 19 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).



Fonte: Próprio autor

Figura 5.6 – Similar à figura 5.5 para a previsão do dia 18 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.



Fonte: Próprio autor

Tabela 5.1 – Tabela com as correlações de Pearson da simulação das 24 horas de todas as variáveis analisadas com o Caso 1. Maiores valores de cada variável com a cor verde e os segundos valores com a cor verde claro.

Variável 24h	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5
PNMM	0,504	0,316	0,84	0,653	0,017
ESP	0,557	0,643	0,593	0,611	0,654
HGT500MB	0,79	0,768	0,875	0,843	0,721
UGRD850MB	0,011	-0,023	0,609	0,18	-0,3
VGRD850MB	0,51	0,353	0,787	0,727	0,192
SPFH850MB	0,555	0,548	0,547	0,562	0,455
TEMP850MB	0,681	0,702	0,826	0,758	0,703
UGRD200MB	0,077	0,517	0,51	0,235	0,111
VGRD200MB	0,485	0,539	0,755	0,653	0,2

Tabela 5.2 – Similar a tabela 5.1 para a simulação das 48 horas anteriores ao evento.

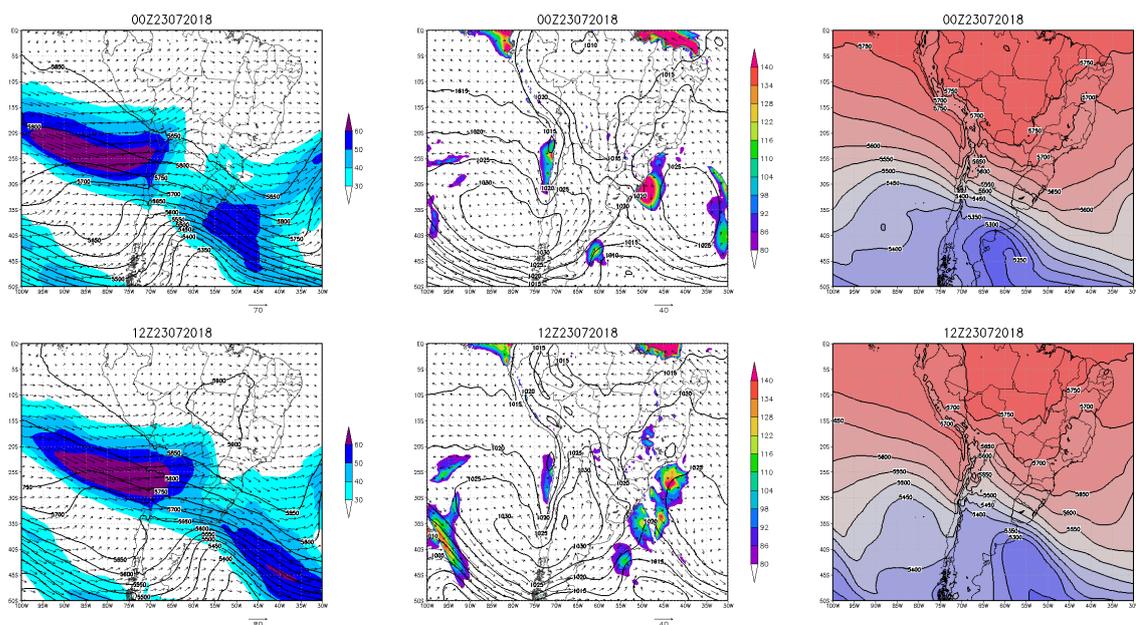
Variável 48h	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5
PNMM	0,493	0,326	0,854	0,655	0,037
ESP	0,587	0,668	0,622	0,64	0,679
HGT500MB	0,816	0,804	0,901	0,871	0,757
UGRD850MB	-0,003	-0,041	0,598	0,167	-0,28
VGRD850MB	0,52	0,352	0,818	0,751	0,221
SPFH850MB	0,597	0,58	0,58	0,598	0,496
TEMP850MB	0,716	0,726	0,85	0,791	0,737
UGRD200MB	0,112	0,573	0,532	0,276	0,143
VGRD200MB	0,49	0,514	0,763	0,645	0,196

5.2 CASO 2

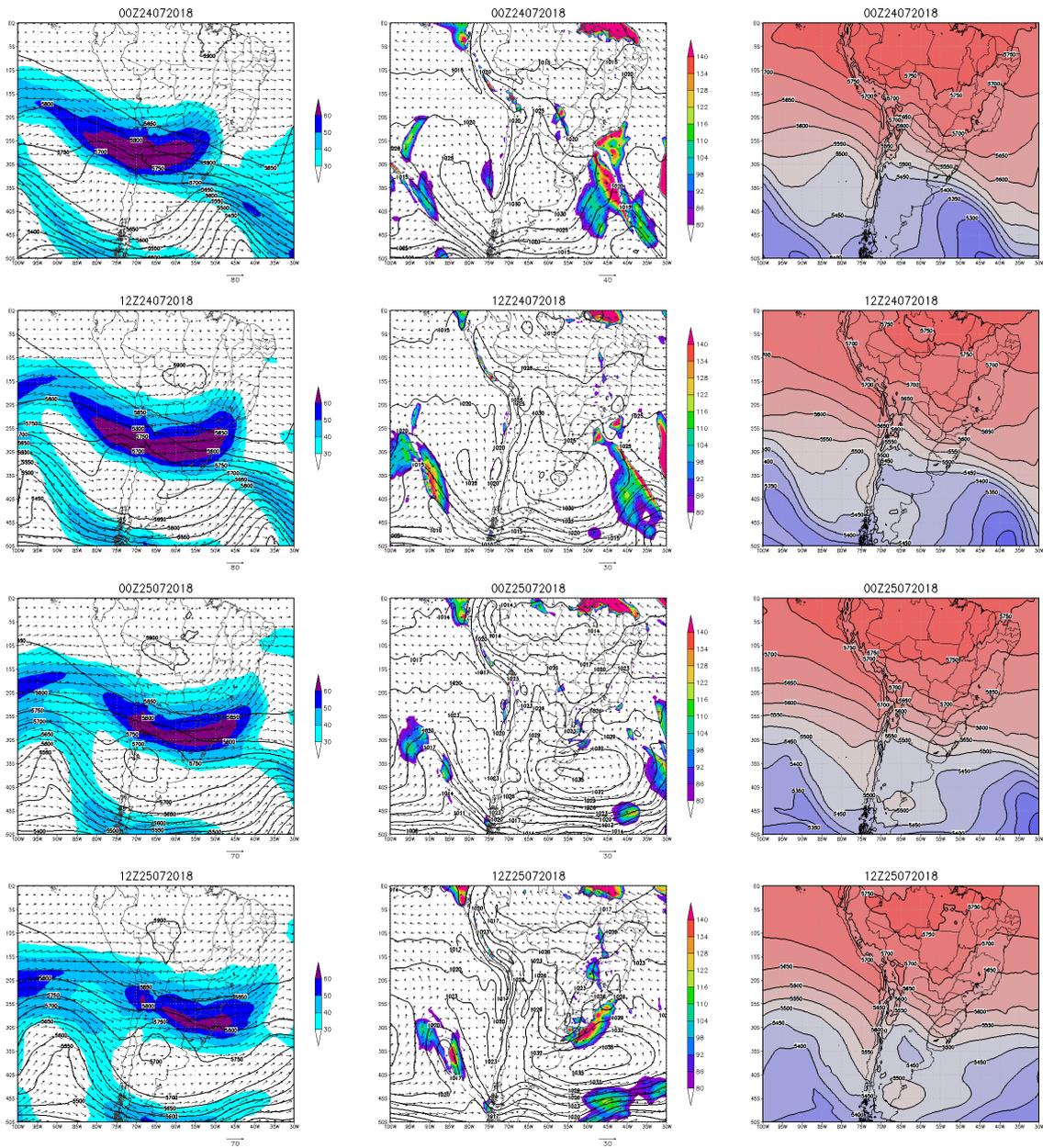
O caso 2 (Figura 5.7), ocorrido no dia 25 de julho de 2018, apresentou em médios níveis, um cavado transiente passando sobre o Centro-Sul da Argentina com deslocamento zonal ao longo dos dias 23, 24 e 25, porém ao norte do eixo do cavado, no dia 24, é possível identificar a quebra do eixo e o qual permanece estacionário a oeste dos Andes, até o dia 25, de onde inicia seu deslocamento sobre o continente, com um núcleo frio fechado, em um padrão de VCAN (subtropical) (PALMÉN, 1949). Em superfície, entre os dias 23 e 24 de julho, identifica-se a aproximação de um anticiclone transiente, que promove vento de leste sobre o RS. Ao longo do dia 25 é notado uma evidente queda dos valores de pressão ao nível médio do mar, com o fechamento de isóbaras, característico de um ciclone, porém apesar do posicionamento geográfico (extratropical) não tem característica frontal, o qual pode ser identificado pela baixa variação dos valores e fraco gradiente horizontal da espessura entre 1000 e 500 hPa.

A imagem de satélite do GOES-16 das 12 UTC do dia 25 de julho de 2018 (Figura 5.8) mostra um intenso aglomerado de nebulosidade em todo o leste e nordeste do RS, mas os valores de temperatura de brilho do canal 13 não indicam uma natureza convectiva intensa para este evento.

Figura 5.7 – Situação sinótica do caso 2: 1ª coluna vento em 200 hPa (hachurado), Altura geopotencial em 500 hPa (linhas), Vento em 200 hPa (vetores); 2ª coluna Pressão ao nível médio do mar (isolinhas), Vento em 850 hPa (Vetores), Fluxo de umidade (hachurado); 3ª coluna Espessura entre 500 hPa e 1000 hPa.

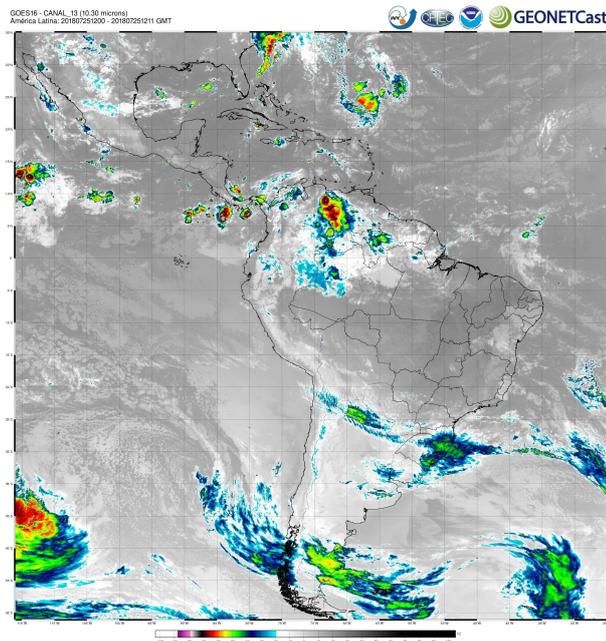


(continuação)



Fonte: Próprio autor

Figura 5.8 – Imagem de satélite do canal 13 das 12 UTC do dia 25 de julho de 2018 .

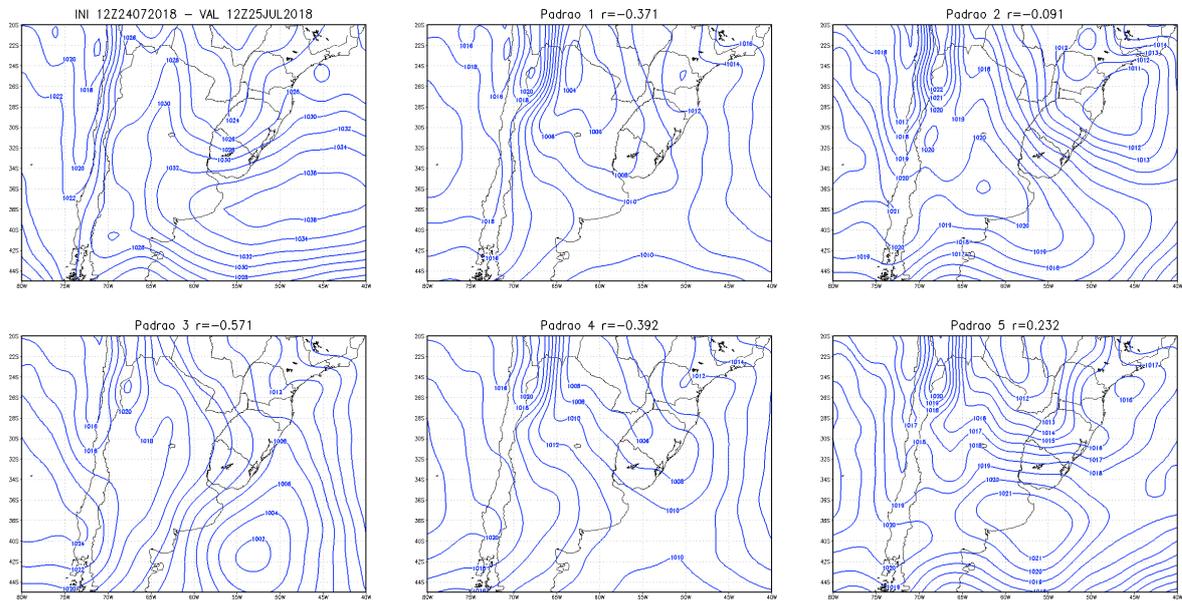


Fonte: CPTEC

Nos padrões apresentados por Santos (2012), o Padrão 2 (Figura 4.3) com um ciclone desenvolvido no litoral do RS, proveniente do deslocamento de VCAN, com quebra do eixo do cavado em 500 hPa, mostrou-se qualitativamente com maior semelhança das condições sinóticas com este evento. Nos acumulados de precipitação este padrão também mostrou-se como o que mais se assemelhou ao Padrão 2 (Figuras 4.3C e 4.7B), com os maiores acumulados concentrados no centro leste do RS.

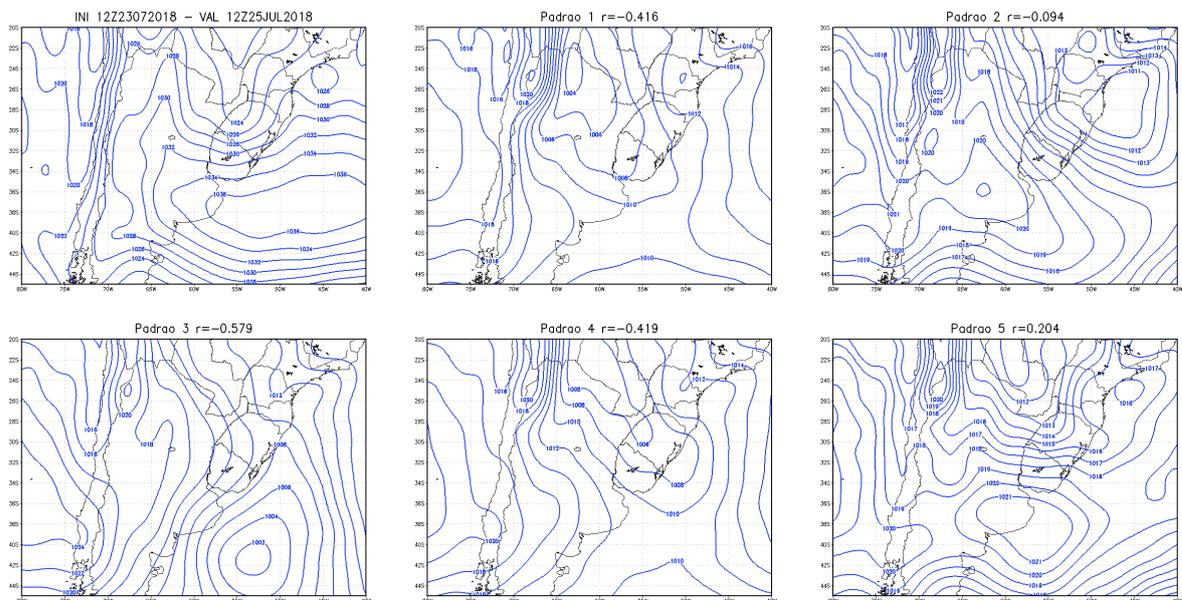
Diferente do Caso 1, na análise das correlações com todas as variáveis (Tabelas 5.3 e 5.4), não foi possível identificar um indicativo claro de maior correlação com um dos padrões atmosféricos, como na altura geopotencial (Figuras 5.11 e 5.12) em que os valores se mantiveram altos para todos os Padrões e as demais variáveis não convergiram para apenas um Padrão, em especial a PNMM (Figuras 5.9 e 5.10), nesta variável, a sensibilidade de posição do ponto em que se estabeleceu as menores pressões dos campos do GFS com os padrões atmosféricos produziu grande impacto nas correlações.

Figura 5.9 – Mapas espaciais da pressão ao nível médio do mar da previsão do dia 14 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).



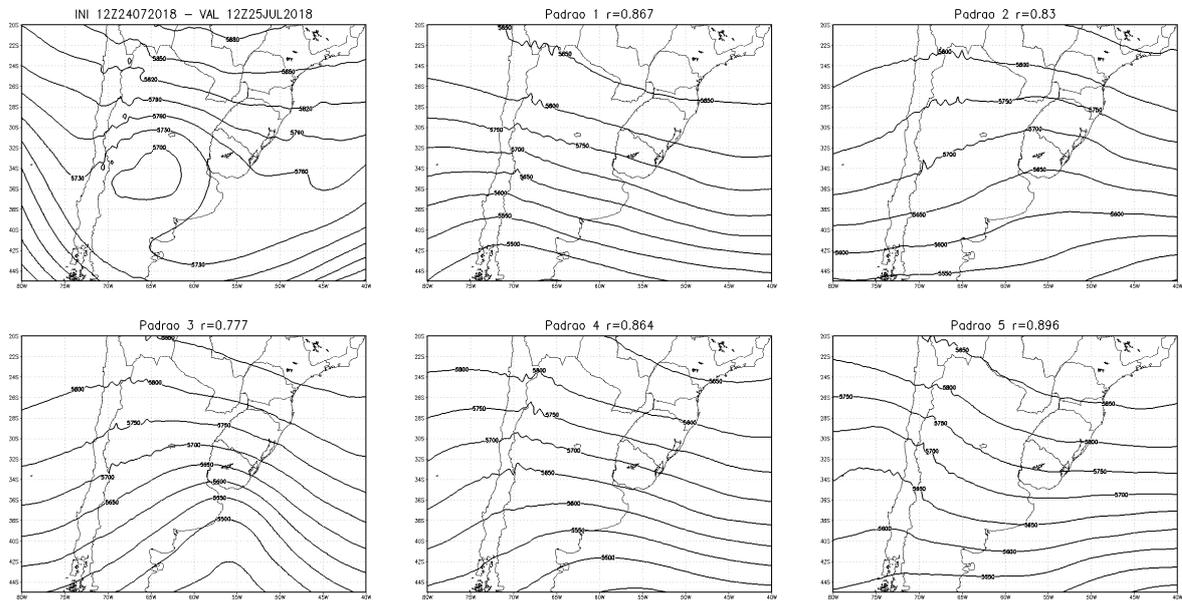
Fonte: Próprio autor

Figura 5.10 – Similar à figura 5.9 para a previsão do dia 23 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.



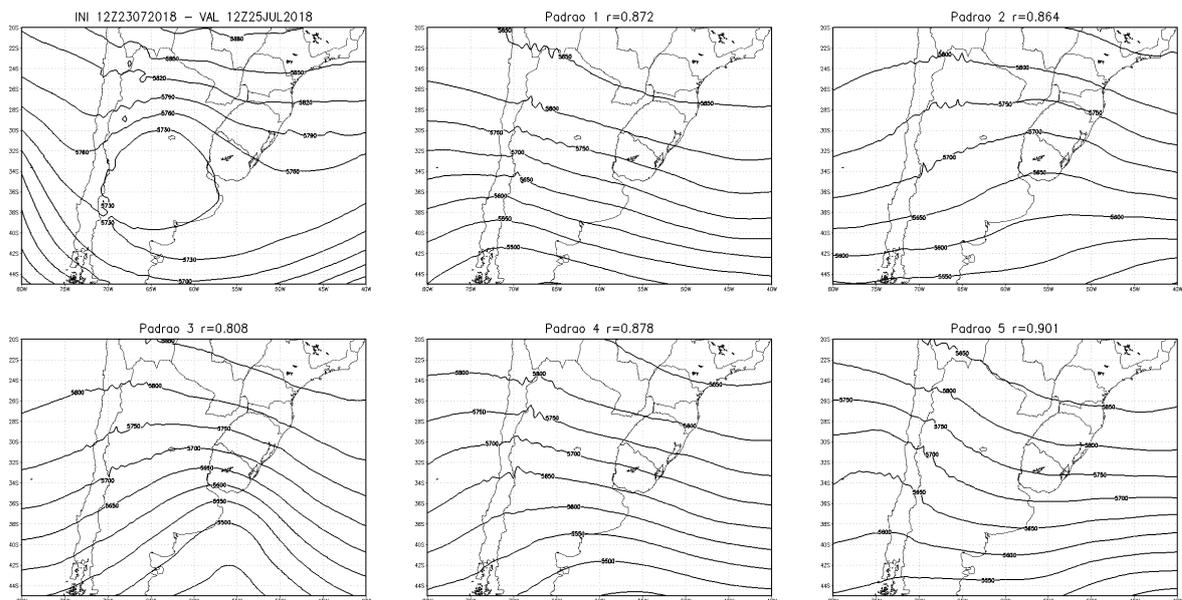
Fonte: Próprio autor

Figura 5.11 – Mapas espaciais da altura geopotencial em 500 hPa da previsão do dia 24 de julho (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).



Fonte: Próprio autor

Figura 5.12 – Similar à figura 5.11 para a previsão do dia 23 de julho (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.



Fonte: Próprio autor

Tabela 5.3 – Tabela com as correlações de Pearson da simulação das 24 horas de todas as variáveis analisadas com o Caso 2. Maiores valores de cada variável com a cor verde e os segundos valores com a cor verde claro.

Variável 24h	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5
PNMM	-0,377	-0,202	-0,609	-0,411	0,005
ESP	0,889	0,902	0,911	0,89	0,901
HGT500MB	0,77	0,615	0,609	0,706	0,76
UGRD850MB	0,468	0,25	-0,3	0,31	0,365
VGRD850MB	0,113	0,37	0,081	0,212	0,4
SPFH850MB	0,699	0,736	0,726	0,725	0,67
TEMP850MB	0,677	0,795	0,777	0,734	0,797
UGRD200MB	-0,586	0,044	-0,156	-0,329	-0,206
VGRD200MB	0,144	-0,51	-0,337	-0,115	0,293

Tabela 5.4 – Similar a tabela 5.3 para a simulação das 48 horas anteriores ao evento.

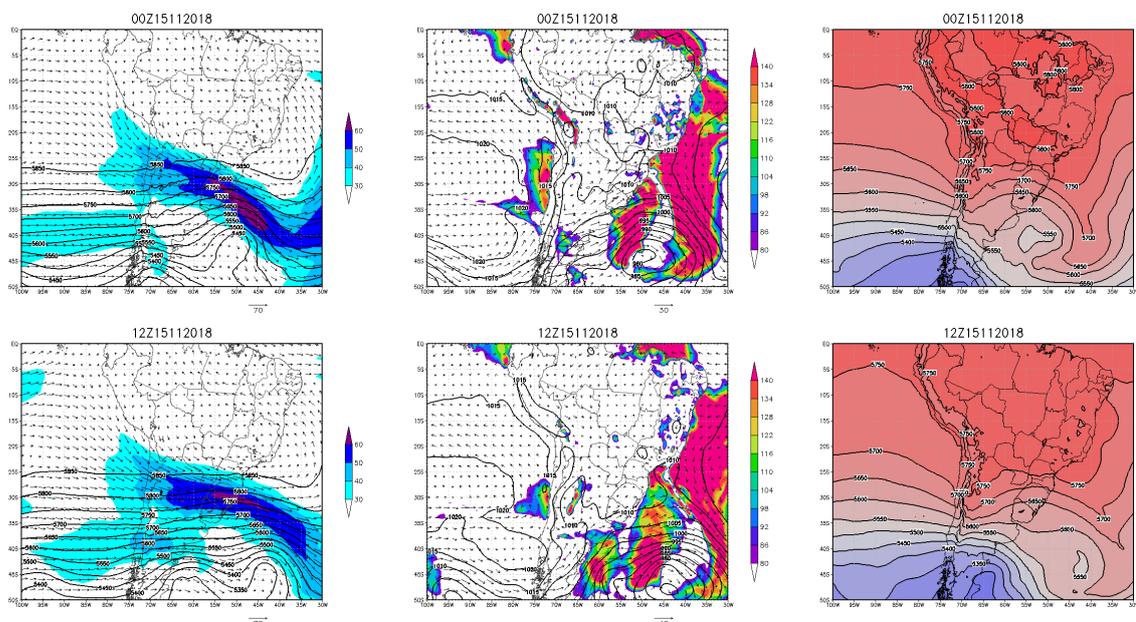
Variável 24h	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5
PNMM	-0,377	-0,202	-0,609	-0,411	0,005
ESP	0,889	0,902	0,911	0,89	0,901
HGT500MB	0,77	0,615	0,609	0,706	0,76
UGRD850MB	0,468	0,25	-0,3	0,31	0,365
VGRD850MB	0,113	0,37	0,081	0,212	0,4
SPFH850MB	0,699	0,736	0,726	0,725	0,67
TEMP850MB	0,677	0,795	0,777	0,734	0,797
UGRD200MB	-0,586	0,044	-0,156	-0,329	-0,206
VGRD200MB	0,144	-0,51	-0,337	-0,115	0,293

5.3 CASO 3

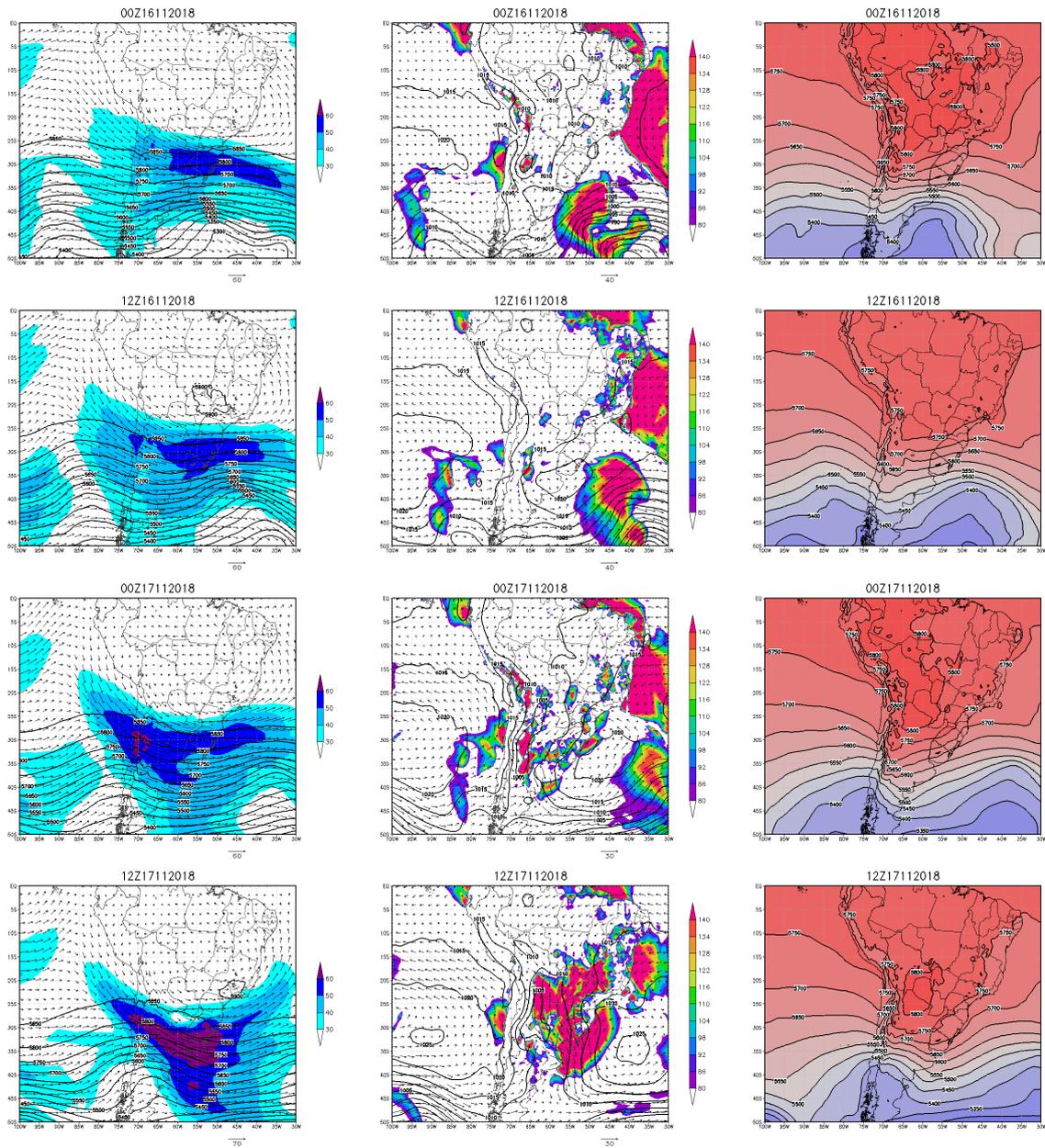
O caso 3, ocorreu no dia 17 de novembro de 2018 (Figura 5.13), foi precedido pela presença dos jatos subtropical e polar posicionados sobre o RS e em superfície, um centro de alta pressão, associados a uma condição pós frontal com fraco gradiente de temperatura, no dia 16 de novembro. No dia 17, o centro de alta pressão teve deslocamento para o Oceano Atlântico e sobre o estado a condição dos ventos foi de norte/nordeste, caracterizado por um intenso fluxo de umidade na baixa troposfera. A pressão em superfície acentua a sua queda sobre o oeste do RS, no Uruguai e centro da Argentina, às 12 UTC, ainda do dia 17, foi observado o desenvolvimento convectivo sobre esta região (Figura 5.14).

A condição atmosférica apresentou característica pré-frontal com um cavado frontal em 500 hPa sobre os Andes, baixo gradiente de espessura e intensificação da queda de pressão sobre o sudeste da América do Sul. Estas configurações e comportamento da precipitação são semelhantes ao Padrão 1 de Santos (2012) (Figura 4.2C). Na precipitação, esta característica se manteve, como pode ver nas figuras 4.2C e 4.7C, com a fronteira com o Uruguai tendo os maiores acumulados.

Figura 5.13 – Situação sinótica do caso 3: 1ª coluna vento em 200 hPa (hachurado), Altura geopotencial em 500 hPa (linhas), Vento em 200 hPa (vetores); 2ª coluna Pressão ao nível médio do mar (isolinhas), Vento em 850 hPa (Vetores), Fluxo de umidade (hachurado); 3ª coluna Espessura entre 500 hPa e 1000 hPa.

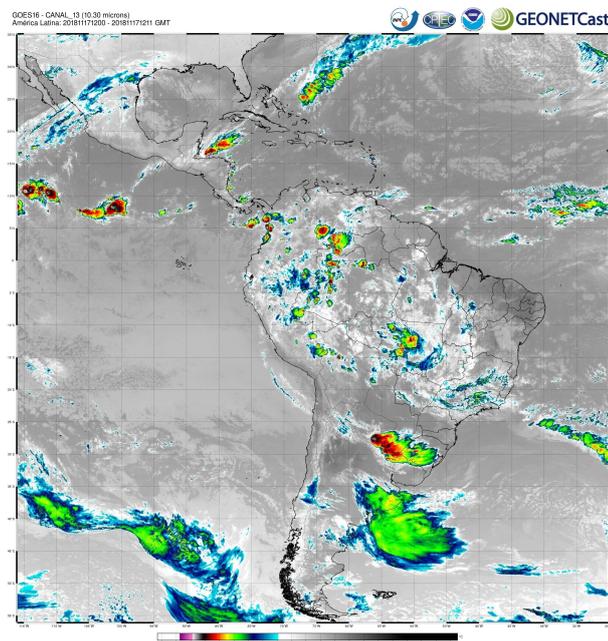


(continuação)



Fonte: Próprio autor

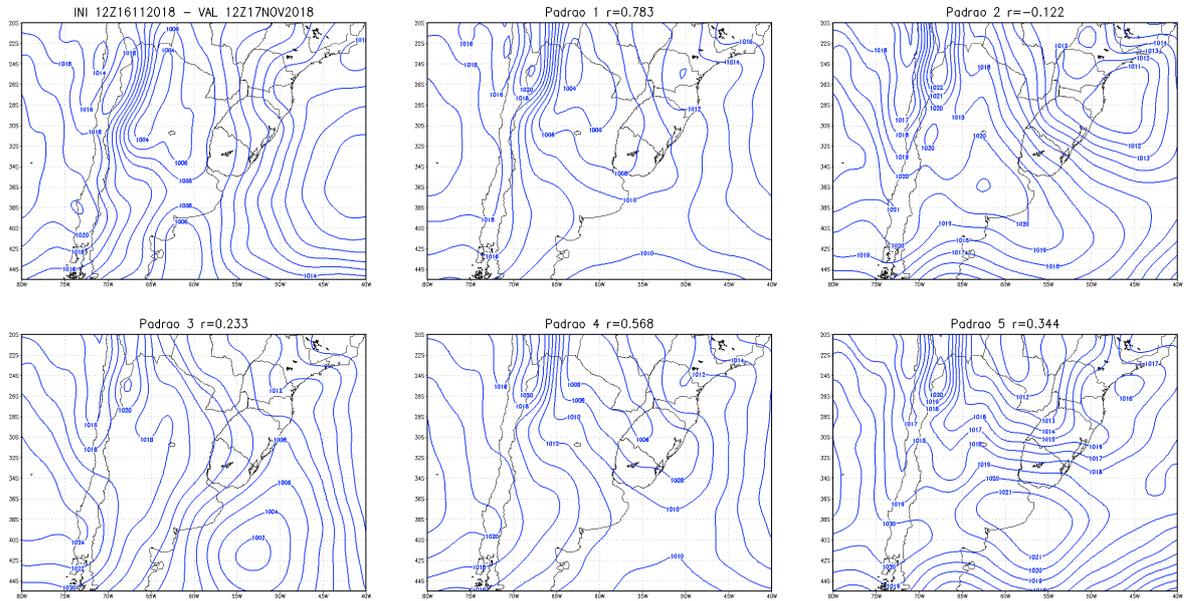
Figura 5.14 – Imagem de satélite do canal 13 das 12 UTC do dia 17 de novembro de 2018



Fonte: CPTEC

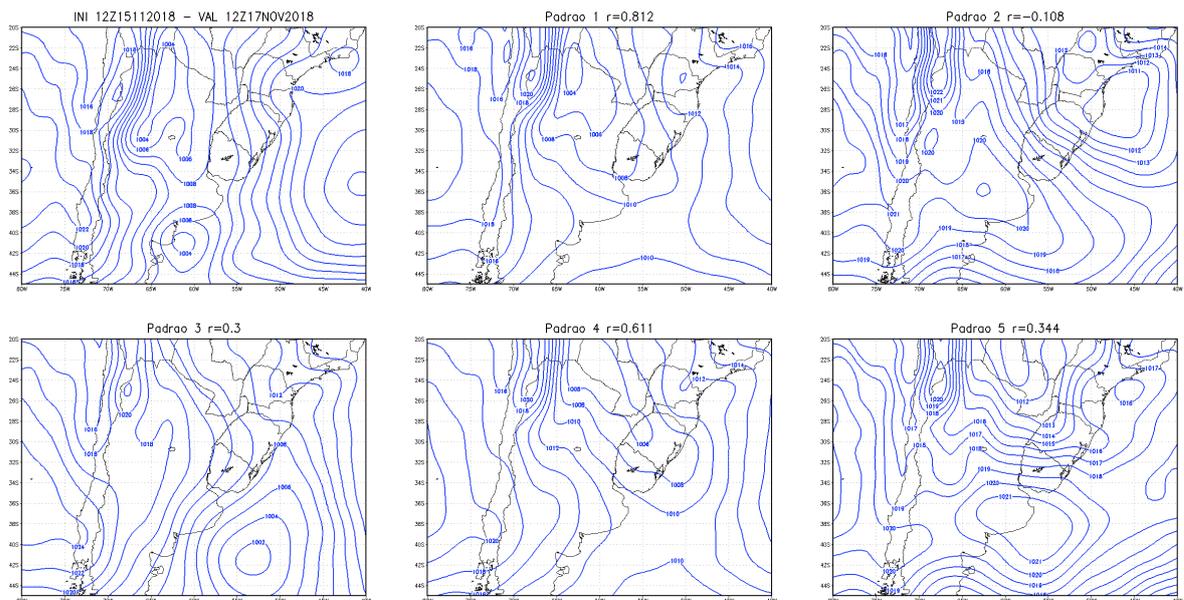
Assim como no Caso 1, a PNMM obteve valores quantitativos bastante consistentes com esta análise para o dia do evento, previsto com 24 horas e 48 horas de antecedência, com $r=0.783$ (figura 5.15) e $r=0.812$ (figura 5.16), respectivamente, para o Padrão 1. Os campos de altura geopotencial em 500 hPa (figuras 5.17 e 5.18) não demonstram uma diferenciação clara entre os Padrões. No entanto, analisando as tabelas de correlações (Tabelas 5.5 e 5.6) fica claro que o padrão 1 apresenta os valores mais altos, seguido do padrão 4.

Figura 5.15 – Mapas espaciais da pressão ao nível médio do mar da previsão do dia 16 de novembro (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).



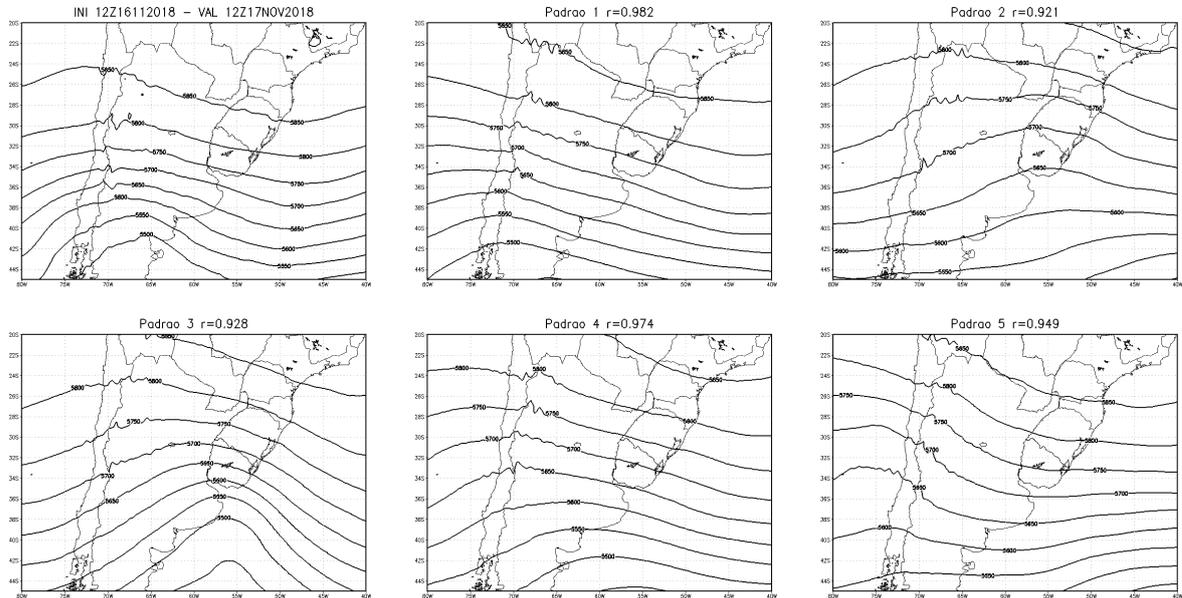
Fonte: Próprio autor

Figura 5.16 – Similar à figura 5.15 para a previsão do dia 15 de novembro (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.



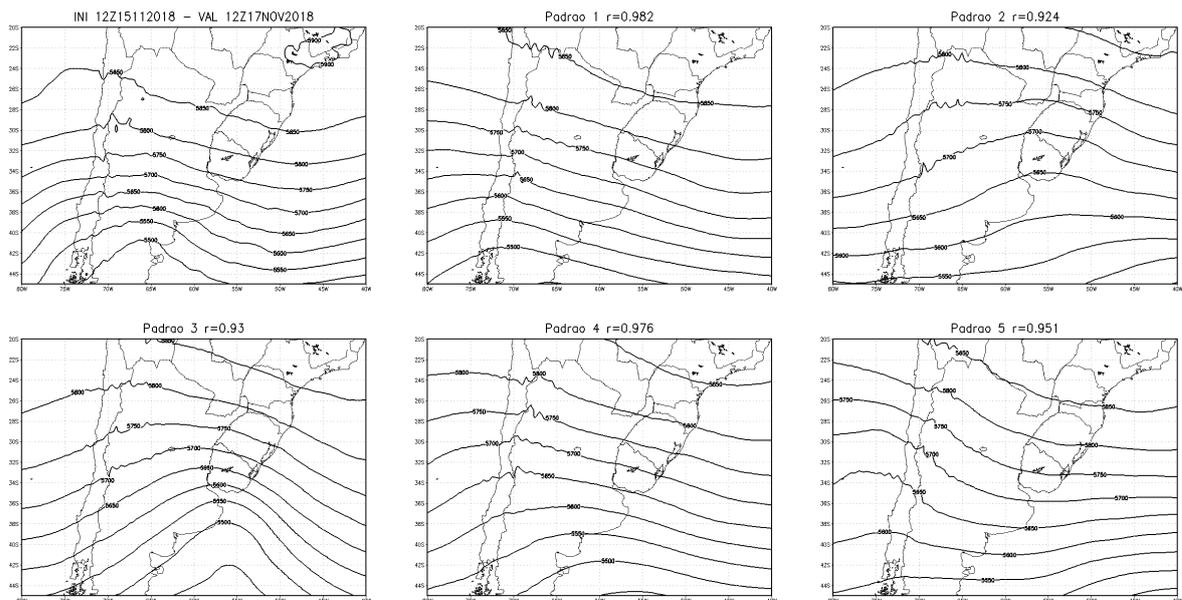
Fonte: Próprio autor

Figura 5.17 – Mapas espaciais da altura geopotencial da previsão do dia 16 de novembro (24 horas antes do evento) e os padrões espaciais de Santos (2012) e indicação da correlação obtida na comparação da análise com os padrões (r).



Fonte: Próprio autor

Figura 5.18 – Similar à figura 5.17 para a previsão do dia 15 de novembro (48 horas antes do evento) para o horário do evento de precipitação.



Fonte: Próprio autor

Tabela 5.5 – Tabela com as correlações de Pearson da simulação das 24 horas de todas as variáveis analisadas com o Caso 3. Maiores valores de cada variável com a cor verde e os segundos valores com a cor verde claro.

Variável 24h	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5
PNMM	0,783	-0,122	0,233	0,568	0,344
ESP	0,95	0,858	0,855	0,933	0,943
HGT500MB	0,982	0,921	0,928	0,974	0,949
UGRD850MB	0,545	0,178	0,267	0,389	0,293
VGRD850MB	0,688	-0,006	0,188	0,488	0,214
SPFH850MB	0,748	0,561	0,481	0,686	0,752
TEMP850MB	0,918	0,758	0,777	0,887	0,884
UGRD200MB	0,609	0,237	0,477	0,739	0,799
VGRD200MB	0,633	-0,133	-0,002	0,549	0,819

Tabela 5.6 – Similar a tabela 5.5 para a simulação das 48 horas anteriores ao evento.

Variável 48h	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5
PNMM	0,812	-0,108	0,3	0,611	0,344
ESP	0,954	0,854	0,855	0,936	0,944
HGT500MB	0,982	0,924	0,93	0,976	0,951
UGRD850MB	0,5	0,152	0,302	0,355	0,235
VGRD850MB	0,717	-0,013	0,25	0,524	0,177
SPFH850MB	0,77	0,59	0,525	0,712	0,758
TEMP850MB	0,918	0,741	0,766	0,88	0,871
UGRD200MB	0,645	0,23	0,495	0,759	0,81
VGRD200MB	0,682	-0,144	0,021	0,58	0,832

6 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou a avaliação da aplicabilidade do uso de padrões atmosféricos na previsão do tempo para eventos de precipitação de maior intensidade, para o estado do Rio Grande do Sul.

Por tratar-se de uma aplicação pouco usual, nesta escala de tempo, não há uma metodologia específica para a comparação quantitativa da similaridade entre dois campos sinóticos, após alguns testes, a correlação linear apresentou resultados satisfatórios, na análise dos casos estudados neste trabalho, mesmo levando em consideração a sua sensibilidade quanto a posição de desenvolvimento de algum sistema, como pode ser visto para o Caso 2.

Dentre as variáveis analisadas, a PNMM apresentou um comportamento mais claro em diferenciar, na comparação do previsto com os Padrões atmosféricos de Santos (2012), qual teve maior similaridade e que foi constatado qualitativamente por meio da análise sinótica e pelos acumulados de precipitação observados nos eventos, já a altura geopotencial não teve esta sensibilidade e manteve-se com valores elevados de r para todos os padrões e nos três casos de estudos.

Dos casos estudados, os padrões de frente fria e de SCM tiveram um bom reconhecimento através das análises de correlação e apontou, com até 48h de antecedência, as regiões com maiores acumulados de precipitação sobre o estado. No caso de VCAN (Caso 2), a sensibilidade na posição do desenvolvimento do ciclone em superfície não apresentou uma diferenciação clara entre os padrões, mas pôde ser visto a similaridade através da comparação dos campos acumulados de chuva observado com o do Padrão 2.

Em função do número restrito de casos analisados neste estudo, a aplicação destes Padrões para as demais estações do ano não foi determinado. Ainda assim, com o reconhecimento satisfatório dos padrões de frente fria e SCM, casos 1 e 3 respectivamente, os principais sistemas precipitantes do RS, podemos indicar que a metodologia é promissora e pode ser aplicada, em modo teste, para todo o ano.

Sugestão de trabalhos futuros:

- Com a operacionalização da metodologia, testar para mais casos e em diferentes estações do ano;
- Aplicar a metodologia para outros modelos de previsão do tempo, globais e de escala regional (WRF);
- Criar um ambiente WEB operacional e interativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVISI, S.; FRANCHINI, M.; MARINELLI, A. A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting. **Journal of hydroinformatics**, IWA Publishing, v. 9, n. 1, p. 39, 2007.

ANDRADE, K. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2005. 185 f. **Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, So Jos dos Campos**, 2005.

BONNER, W. D. Climatology of the low level jet. **Mon. Wea. Rev.**, v. 96, n. 12, p. 833–850, 1968.

CARDOSO, A. d. O. Relações entre a TSM nos oceanos Atlântico e Pacífico e as condições climáticas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. **São Paulo**, 2005.

CARLTON, E. J. et al. Heavy rainfall events and diarrhea incidence: the role of social and environmental factors. **American journal of epidemiology**, Oxford University Press, v. 179, n. 3, p. 344–352, 2013.

CAVALCANTI, I. F. et al. **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2009.

CLARK, A. J. et al. Convection-allowing and convection-parameterizing ensemble forecasts of a mesoscale convective vortex and associated severe weather environment. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 4, p. 1052–1081, 2010.

DURKEE, J. D.; MOTE, T. L.; SHEPHERD, J. M. The contribution of mesoscale convective complexes to rainfall across subtropical South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 17, p. 4590–4605, 2009.

FOSS, T. et al. A simulation study of the model evaluation criterion mmre. 2002.

FRITSCH, J. et al. Quantitative precipitation forecasting: Report of the eighth prospectus development team, US Weather Research Program. **Bulletin of the American Meteorological Society**, JSTOR, v. 79, n. 2, p. 285–299, 1998.

HARNACK, R. et al. The determination of observed atmospheric differences between heavy and light precipitation events in New Jersey, USA. **International journal of climatology**, Wiley Online Library, v. 21, n. 12, p. 1529–1560, 2001.

HOUZE JR, R. A. Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, Wiley Online Library, v. 42, n. 4, 2004.

KALNAY, E. **Atmospheric modeling, data assimilation and predictability**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 61, n. 11, p. 1374–1387, 1980. ISSN 00030007, 15200477. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/26221473>>.

MARENGO, J. A. et al. Low-frequency variability of the SALLJ. **CLIVAR exchanges**, v. 9, n. 1, p. 26–27, 2004.

MASS, C. F. et al. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? The results of two years of real-time numerical weather prediction over the Pacific Northwest.

Bulletin of the American Meteorological Society, American Meteorological Society, v. 83, n. 3, p. 407–430, 2002.

MELLER, A. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. 2012.

MELO, A. B. C. et al. Previsibilidade da precipitação na região semi-árida no nordeste do Brasil, durante a estação chuvosa, em função do comportamento diário das chuvas na pré-estação. Universidade Federal de Campina Grande, 1997.

OLIVEIRA, A. S. de. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul ea convecção da Amazônia**. 1986. Tese (Doutorado) — INPE, 1986.

PALMÉN, E. Origin and structure of high-level cyclones south of the: Maximum westerlies. **Tellus**, Wiley Online Library, v. 1, n. 1, p. 22–31, 1949.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 25, n. 2, 2010.

ROEBBER, P. J. et al. Toward improved prediction: High-resolution and ensemble modeling systems in operations. **Weather and Forecasting**, v. 19, n. 5, p. 936–949, 2004.

SANTOS, D. C. **Padrões atmosféricos associados a extremos de precipitação na primavera no estado do Rio Grande do Sul**. 2012. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria. Disponível em < http://w3.ufsm.br/meteorologia/pos/dissertacoes/17_Daniel_Caetano_Santos_18_09_2012.pdf >. Acesso em: 10/02, 2012.

SANTOS, D. C. **Modelagem numérica e técnicas de ensemble em mesoescala no estudo de sistemas convectivos de mesoescala na bacia do prata**. 2015. Tese (Doutorado), 2015.

THEIS, S.; HENSE, A.; DAMRATH, U. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach. **Meteorological Applications**, Cambridge University Press, v. 12, n. 3, p. 257–268, 2005.

YOUNIS, J.; ANQUETIN, S.; THIELEN, J. The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 5, n. 1, p. 345–377, 2008.