MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.11.04.35-TDI

CARACTERIZAÇÃO E VARIABILIDADE DE SITUAÇÕES SINÓTICAS ASSOCIADAS A EPISÓDIOS DE CHUVA INTENSA E CHUVA PERSISTENTE DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

José Paulo de Campos Gonçalves

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Marcelo Enrique Seluchi, aprovada em 17 de agosto de 2015.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JR8FG5>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.11.04.35-TDI

CARACTERIZAÇÃO E VARIABILIDADE DE SITUAÇÕES SINÓTICAS ASSOCIADAS A EPISÓDIOS DE CHUVA INTENSA E CHUVA PERSISTENTE DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

José Paulo de Campos Gonçalves

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Marcelo Enrique Seluchi, aprovada em 17 de agosto de 2015.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JR8FG5>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Gonçalves, José Paulo de Campos.

G586c Caracterização e variabilidade de situações sinóticas associadas a episódios de chuva intensa e chuva persistente durante a estação chuvosa na região sudeste do Brasil / José Paulo de Campos Gonçalves. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxvi + 139 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.11.04.35-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientador : Dr. Marcelo Enrique Seluchi.

1. Chuva intensa. 2. Chuva persistente. 3. Climatologia sinótica. 4. Compostos. 5. Padrões de circulação. I.Título.

CDU 551.578.1(815)

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): ***José Paulo de Campos Gonçalves***

Título: **" CARACTERIZAÇÃO E VARIABILIDADE DE SITUAÇÕES SINÓTICAS ASSOCIADAS A EPISÓDIOS DE CHUVA INTENSA E CHUVA PERSISTENTE DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL"**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Mestre* em *Meteorologia*

Dr. Dirceu Luis Herdies

Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcelo Enrique Seluchi

Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Giovanni Dolif Neto

Convidado(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 17 de Agosto de 2015

"A persistência realiza o impossível."

Provérbio Chinês

A meus pais, José Luiz e Mara Lúcia, meus irmãos, Luiz Henrique e Marco Aurélio, e à memória de meus avôs, Rui de Campos e Antonio Gonçalves.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por tudo.

Ao Dr. Marcelo Seluchi pela orientação e ensinamentos transmitidos, incentivo, confiança e paciência.

Ao Dr. Gustavo Escobar pela amizade, ensinamentos e valiosa colaboração neste trabalho.

Aos colegas e ex-colegas do Grupo de Previsão de Tempo (GPT), do qual pude fazer parte e vivenciar um período de muito aprendizado e amizade.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estudo, e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climáticos (CPTEC) pela infraestrutura oferecida.

A todos os funcionários, secretárias e professores do curso de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), principalmente ao Dr. Nelson Ferreira à Dra. Simone Costa, pela atenção e paciência durante as aulas.

A todos os colegas da PGMET, em especial à turma de 2013, pela união durante os estudos e pelos momentos de descontração.

Aos membros da Banca, Dr. Giovanni Dolif e Dr. Dirceu Herdies pelas sugestões de aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao NCEP (National Centers for Environmental Prediction), por disponibilizar os dados das reanálises CFSR, ao ESRL (Earth System Research Laboratory), pelos dados de precipitação "PSD South America Daily Gridded Precipitation", bem como todas as agências e institutos que forneceram informações pluviométricas para a concepção deste conjunto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão do Projeto 473149/2012-5 e financiamento da bolsa de mestrado processo N.º 132662/2013-2.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste estudo.

Muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa das características sinóticas e da variabilidade dos padrões de circulação associados a eventos de Chuva Intensa (CI) e Chuva Persistente (CP) na Região Sudeste do Brasil (SEB). A seleção dos eventos utilizou dados de precipitação diária do "PSD South America Daily Gridded Precipitation" durante a estação chuvosa (outubro a março), entre 1979 a 2010. Para a análise dos campos sinóticos utilizou-se os dados da reanálise "Climate Forecast System Reanalysis" (CFSR). O estudo baseia-se na análise de composições de campos e de anomalias de variáveis atmosféricas dos dias dos eventos de chuva. As análises dos "Episódios de Chuvas Intensas" (ECI) e "Episódios de Chuvas Persistentes" (ECP) consistem em sequencias temporais de campos dos respectivos episódios de chuva, desde três dias antes do início e durante as chuvas, que permitiram avaliar a evolução temporal das características associadas. A variabilidade dos padrões de circulação foi investigada através da Análise de Componentes Principais Rotacionadas (ACP) dos campos sequenciais de pressão reduzida ao nível médio do mar dos ECI e ECP. A partir dos episódios altamente correlacionados com as respectivas componentes de ECI e ECP, foram geradas composições denominadas como "Padrões de Sequências Principais" (PSP) que possibilitaram a identificação dos principais modos de desenvolvimento dos sistemas associados a cada tipo de chuva. Os resultados mostraram que os eventos de CI ocorreram com maior frequência em outubro, enquanto que as CP têm a sua máxima frequência em janeiro. Os compostos para ambos os tipos de chuva apresentam semelhanças nas características e nos sistemas atmosféricos atuantes, sendo que a magnitude das anomalias é maior para os casos de CI em comparação aos de CP. Destacam-se como características comuns, o resfriamento na média e baixa troposfera no sudeste da América do Sul (AS), a presença de áreas de baixa pressão sobre a SEB e oceano adjacente e de altas pressões ao sul de 40°S, entre o Pacífico, sul do continente e Atlântico, associadas a um aquecimento da troposfera média nestas áreas. O desenvolvimento dos ECI está vinculado à propagação de um trem de onda de maior amplitude, que favorece o desenvolvimento de distúrbios sinóticos mais vigorosos e que se deslocam desde a Argentina até a SEB. Os ECP estão associados a sistemas menos vigorosos que se desenvolvem ao sudeste da AS a partir da propagação de um trem de onda de maior extensão longitudinal e com deslocamento mais lento. Os PSP ilustraram cinco padrões de evolução dos sistemas para cada tipo de chuva. Os PSP predominantes nos ECI são associados à incursão de sistemas frontais adjacentes à SEB e Atlântico, enquanto que os PSP de ECP ilustram processos frontais ou não frontais adjacentes à SEB, simultâneos à intensificação dos anticiclones subtropicais do Pacífico e Atlântico ao sul de 40°S, neste último vinculado a formação de um anticiclone de tipo bloqueio.

Palavras-chave: Chuva Intensa. Chuva Persistente. Climatologia Sinótica. Compostos. Padrões de Circulação.

CHARACTERISTCS AND VARIABILITY OF SYNOPTIC SITUATIONS ASSOCIATED WITH HEAVY RAINFALL AND PERSISTENT RAINFALL EPISODES DURING THE RAINY SEASON IN SOUTHEASTERN BRAZIL

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of characteristics and variability of atmospheric circulation patterns associated with heavy (HR) and persistent rainfall (PR) events over southeastern Brazil (SEB). The events have been selected using daily rainfall data "PSD South America Daily Gridded Precipitation" during the SEB rainy season (October-March) from the 1979 to 2010 period. The synoptic features were analyzed by means of composites analysis of atmospheric variables using the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). The temporal evolution of the synoptic fields was evaluated three days in advance and during the precipitation episodes, using composites of sequential fields. Those episodes are named as "Persistent Rainfall Episodes" (PRE) and "Heavy Rainfall Episodes" (HRE). The HRE and PRE were also employed to identify the Principal Sequence Patterns (PSP) that illustrates the development of synoptic systems, by applying the Rotated Principal Component Analysis (PCA) in the respective HRE and PRE sequential mean sea level pressure fields. Episodes higher correlated with PSPs were used to produce composites of atmospheric variables in order to characterize each typical circulation pattern. Results showed that HR (PR) events occurs especially in October (January). Composites pointed similar synoptic features in both types (intense and persistent) of rainfall events. However, the anomalies associated with HR are greater than PR events. Some features are common in both types of events, as the cooling in the middle and lower tropospheric levels over southeastern South America (SA), the low surface pressure centers over SEB and the adjacent ocean, high pressure systems south of 40°S associated with warming at middle and lower troposphere. HRE episodes are related to higher amplitude wave trains progression, thus linked to more intense synoptic systems moving from Argentina to SEB. PRE episodes are associated with weaker systems over southeastern South America linked to slower and larger wave trains propagation. Five PSP's for each type of rainfall episode was obtained. The main synoptic process shown in the HRE PSP's are associated to frontal systems progression over SEB and the Atlantic Ocean. The PRE PSP's are linked to frontal or non-frontal processes over the Atlantic Ocean near SEB, simultaneous to Pacific anticyclone intensification around 40°S and/or blocking anticyclones over the Atlantic Ocean.

Keywords: Heavy Rainfall, Persistent Rainfall, Synoptic Climatology, Composites Analysis, Circulation Patterns.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 - Gráfico da frequência sazonal de sistemas frontais no período entre 1980-2002 quanto ao deslocamento: Rota 1/SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/Sudeste, Rota 2/SE e CO, Rota 1/SBA, Rota 2/SE, CO e SBA. 5

Figura 2.2 - Campos compostos associados às frentes frias que se deslocam do Sul até o SEB durante o verão. Em (a), (b) e (c), PNMM e anomalia de ROL (sombreado); em (d), (e) e (f), escoamento e advecção de vorticidade em 500 hPa; em (g), (h) e (i), escoamento e magnitude do vento em 250 hPa. As sequências referem-se a dois e um dia que antecedem a chegada da frente ao SEB. 6

Figura 2.3 - Diferenças entre campos de episódios de Frentes Frias: casos normais versus casos associados a deslizamentos. (a) PNMM (sombreado, hPa) e espessura 500/1000 hPa (linha sólida, m); (b) umidade específica (sombreado, g.kg-1) e vento (barbelas, m.s-1); (c) altura geopotencial-500 hPa (sombreado, m) e temperatura (linha sólida, K); (d) divergência de massa em 250 hPa (sombreado, 10-5s-1) e vento (ms-1)..... 8

Figura 2.4 - Similar à figura 2.3.1, para episódios de ZCAS: casos normais versus casos associados a deslizamentos 9

Figura 2.5 - Compostos de anomalia de PNMM (em contorno cheio e tracejado) para: (a-d) casos de Frente Fria e (e-h) casos de ZCAS sobre o SEB; 2 dias antes (D-2) e o dia do evento (D0). A área sombreada representa nível de significância de 90 %..... 10

Figura 2.6 - Padrões de PNMM associados aos eventos de ZCAS. 11

Figura 2.7 - Padrões atmosféricos obtidos com a ACP-T aplicada aos campos de PNMM, dos dias de chuva intensa no SEB em todos os meses do ano. As séries temporais (gráficos abaixo) mostram a relação de cada padrão com os casos de chuva intensa (variâncias). As linhas tracejadas indicam a correlação de +-0,7. 12

Figura 2.8 - Três Padrões de Sequências Principais (PSP), de campos de PNMM correspondentes aos dias anteriores e ao evento de chuva (Dia -2, Dia -1 e Dia -0). (a) PSP-1, (b) PSP-2 e (c) PSP-3. 13

Figura 2.9 - Cinco padrões de campos de PNMM correspondentes ao mês de dezembro. 14

Figura 3.1 - Domínio utilizado no estudo (azul) e região de interesse dos eventos de chuva (vermelho). 15

Figura 3.2 - Exemplo da estrutura de representação dos dados de precipitação diária, contida no PSD South America Daily Gridded Precipitation. 16

Figura 3.3 - Região Sudeste do Brasil (SEB) e os pontos de grade selecionados para a análise dos dados de precipitação. 16

Figura 3.4 - Possíveis combinações de adjacência mínima entre 3 pontos de grade, relativa ao ponto “15”. 20

Figura 4.1 - Valores médios dos limiares de chuva por mês [mm], para cada tipo de evento de chuva. 27

Figura 4.2 - Distribuição dos dias de chuva por meses e número de datas organizadas como episódios (valores absolutos), para chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 28

Figura 4.3 - Comparações entre as distribuições mensais dos dias de chuva intensa e chuva persistente (valores percentuais). 29

Figura 4.4 - Comparações entre os números de casos de chuva intensa, persistente e dos casos coincidentes de chuva intensa em eventos de chuva persistente (valores percentuais). 29

Figura 4.5 - Contabilização do tipo de sistema atmosférico causador dos episódios de chuva entre 1996 e 2010 (valores percentuais). 30

Figura 4.6 - Distribuição dos dias de chuva intensa, persistente (valores percentuais) e respectivos valores médios do Oceanic Niño Index (ONI), calculados para cada estação chuvosa analisada. 31

Figura 4.7 - Campos de anomalias de altura geopotencial [mgp] (contorno) e temperatura [K] (sombreado) para o nível de 200 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 33

Figura 4.8 - Compostos de vento horizontal (linhas de corrente) e divergência de massa (sombreado) [10-5.s-1] para o nível de 200 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 34

Figura 4.9 - Compostos (linhas de corrente) e anomalias de magnitude de vento horizontal (sombreado) [m.s-1] para o nível de 200 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 35

Figura 4.10 - Compostos de altura geopotencial [dmgp] para o nível de 500 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 36

Figura 4.11 - Campos de anomalia de altura geopotencial [mgp] (contorno) e temperatura [K] (sombreado) para o nível de 500 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 37

Figura 4.12 - Compostos (linhas de corrente e vetores) e anomalias de magnitude de vento horizontal [m.s-1] (sombreado) para o nível de 500 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 38

Figura 4.13 - Compostos de vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e vetores) e umidade específica [10-3 g.g-1] (sombreado) para o nível de 700 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 39

Figura 4.14 - Campos de anomalia de umidade específica [10-3 g.g-1] para o nível de 850 hPa, dos casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 40

Figura 4.15 - Campos de anomalia de temperatura potencial equivalente [K] para o nível de 850 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 41

Figura 4.16 - Compostos de convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] (sombreado) e vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e vetores) para o nível de 850 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b)..... 42

Figura 4.17 - Compostos (linhas de corrente e vetores) e anomalia de magnitude de vento horizontal [m.s-1] (sombreado) para o nível de 850 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 43

Figura 4.18 - Compostos de temperatura do ar [ºC] em 925 hPa e as respectivas anomalias (painéis inferiores), para os casos de chuva intensa (a, c) e chuva persistente (b, d)..... 44

Figura 4.19 - Compostos de água precipitável [mm] e as respectivas anomalias (painéis inferiores), para os casos de chuva intensa (a, c) e chuva persistente (b, d).46

Figura 4.20 - Campos de anomalias de espessura 500/1000 hPa [mgp] (sombreado) e anomalias de PNMM [hPa] (contorno). Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b). 47

Figura 4.21 - Sequências de campos de anomalias dos Episódios de Chuvas Intensas (ECI). Anomalias de temperatura [K] (sombreado) e altura geopotencial [mgp] (contorno) para o nível de 200 hPa (a) e em 500 hPa (b); anomalias de espessura 500/1000 [mgp] (sombreado) e de PNMM [hPa] (contorno) (c). 50

Figura 4.22 - Similar à figura 4.21, para os Episódios de Chuvas Persistentes (ECP)... 53

Figura 4.23 - Compostos de Índices de Instabilidade e as respectivas anomalias (painéis inferiores): CAPE [J.Kg-1] (a), Índice K (K) (b) e Lifted Index (LI) (c). Figuras ímpares e pares são para os casos de Chuva Intensa e Chuva Persistente, respectivamente..... 55

Figura 4.24 - Legenda dos sistemas meteorológicos demarcados..... 58

Figura 4.25 - 1º Padrão de Sequência Principal (PSP) [adimensional] (a). Sequência de campos compostos de PNMM (contorno) [hPa] e espessura 500/1000 (contorno e sombreado) [dmgp] dos episódios altamente correlacionados (b). Gráfico dos Factor Loadings para cada ECI (c). A linha vermelha destaca os casos de correlação maior ou igual a 0,7. 61

Figura 4.26 - Similar à figura 4.25, para o 2º PSP..... 62

Figura 4.27 - Similar à figura 4.25 para o 3º PSP..... 63

Figura 4.28 - Similar à figura 4.25, para o 4º PSP..... 64

Figura 4.29 - Similar à figura 4.25, para o 5° PSP. 65

Figura 4.30 - 1° Padrão de Sequência Principal (PSP) [adimensional] (a). Sequência de campos compostos de PNMM (contorno) [hPa] e espessura 500/1000 (contorno e sombreado) [dmgp] dos episódios altamente correlacionados (b). Gráfico dos Factor Loadings para cada ECP (c). A linha vermelha destaca os casos de correlação maior ou igual a 0,7. 69

Figura 4.31 - Similar à figura 4.30, para o 2° PSP. 70

Figura 4.32 - Similar à figura 4.30, para o 3° PSP. 71

Figura 4.33 - Similar à figura 4.30, para o 4° PSP. 72

Figura 4.34 - Similar à figura 4.30, para o 5° PSP. 73

Figura 4.35 - Dia zero (D 0) do 1° PSP dos ECI (a) e respectivas composições dos casos altamente correlacionados: PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (b); umidade específica [10-3 g.g-1] (sombreado) e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 925 hPa (c); convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (d); altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (e); vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul) (f). 75

Figura 4.36 - Similar à figura 4.35, para o 2° PSP dos ECI. 77

Figura 4.37 - Similar à figura 4.35, para o 3° PSP dos ECI. 78

Figura 4.38 - Similar à figura 4.35, para o 4° PSP dos ECI. 79

Figura 4.39 - Similar à figura 4.35, para o 5° PSP dos ECI. 80

Figura 4.40 - Terceiro dia (D 3) do 1° PSP dos ECP (a) e respectivas composições dos casos altamente correlacionados: PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (b); umidade específica [10-3 g.g-1] (sombreado) e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 925 hPa (c); convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (d); altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (e); vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul) (f). 82

Figura 4.41 - Similar à figura 4.40, para o 2° PSP dos ECP. 84

Figura 4.42 - Similar à figura 4.40, para o 3° PSP dos ECP. 86

Figura 4.43 - Similar à figura 4.40, para o 4° PSP dos ECP. 87

Figura 4.44 - Similar à figura 4.40, para o 5° PSP dos ECP. 88

Figura 5.1 - Precipitação acumulada em 24h [mm] para o ECI de 13 de fevereiro de 2009 (D 0) e dos dias que o antecede (D -) 91

Figura 5.2 - Imagens de satélite do canal infravermelho realçado (a) e cartas sinóticas (b) referentes ao ECI de 13 de fevereiro de 2009. 92

Figura 5.3 - Dia zero (D 0) em que configura o ECI (13-fev-2009): PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 hPa [dmgp] (sombreado) [hPa] (a); convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b); altura geopotencial para o nível de 500 hPa [dmgp] (c); vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul) (d). 93

Figura 5.4 - Precipitação acumulada em 24h [mm] para o ECP de 13 (D 0) à 16 (D 3) de janeiro de 2007 e dos dias que o antecede (D -). 94

Figura 5.5 - Imagens de satélite do canal infravermelho realçado (a) e cartas sinóticas (b) referentes ao ECP de 13 a 16 de janeiro de 2009. 95

Figura 5.6 - Similar à figura 5.1.3, para o dia três (D 3) em que configura o ECP (16-jan-2007). 96

Figura 6.1 - 1° Modelo de processo sinótico associado aos ECI: “Sistema Frontal”... 105

Figura 6.2 - 2° Modelo de processo sinótico associado aos ECI: “Sistema Sinótico Oceânico”. 106

Figura 6.3 - 3° Modelo de processo sinótico associado aos ECI: “ASAS / Bloqueio/ ZCAS ..... .107

Figura 6.4 - 1° Modelo de processo sinótico associado aos ECP na SEB: “ASPS Intenso / Sistema Sinótico Oceânico”. 109

Figura 6.5 - 2° Modelo de processo sinótico associado aos ECP na SEB: “Cavado SEB/ZCAS”. 110

Figura 6.6 - 3° Modelo de processo sinótico associado aos ECP na SEB: “ASAS / Bloqueio / Cavado SEB / ZCAS”. 111

Figura C.1 - Compostos dos ECI altamente correlacionados com o 1º PSP. PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (a), convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b), altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (c), vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência de massa [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (d) (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul). 125

Figura C.2 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 2º PSP 126

Figura C.3 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 3º PSP. 127

Figura C.4 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 4º PSP. 128

Figura C.5 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 5º PSP. 129

Figura D.1 - Compostos dos ECP altamente correlacionados com o 1º PSP. PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (a), convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b), altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (c), vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência de massa [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (d) (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul). 132

Figura D.2 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 2º PSP. 133

Figura D.3 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 3º PSP. 134

Figura D.4 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 4º PSP. 135

Figura D.5 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 5º PSP. 136

Figura E.1 - Campos sinóticos da 00 UTC do ECI de 13 de fevereiro de 2009 (dia 0). PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (a), convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b), altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (c), vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência de massa [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (d) (contorno vermelho: apenas valores positivos). 137

Figura E.2 - Similar à figura E1, para o ECP de 13 a 16 de janeiro de 2007 (campos da 00 UTC). 138

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 4.1 - Descrição dos conjuntos de casos de chuva, o método de análise e a respectiva quantidade de dias utilizados..... 28

Tabela 4.2 - Correlações entre números de dias de Chuva Intensa (CI), Chuva Persistente (CP) e valores médios do Oceanic Niño Index (ONI). 31

Tabela 4.3 - Resumo das porcentagens de variância explicada pelas nove componentes principais obtidas para cada tipo de episódio. Em destaque as cinco primeiras consideradas para a análise, devido às maiores porcentagens de variância total. 56

Tabela 4.4 - Número de episódios altamente correlacionados com as respectivas componentes principais, utilizados na elaboração dos compostos. 57

Tabela 4.5 - Resumo das variâncias explicadas para cada PSP obtido..... 89

Tabela 6.1 - Resumo das variâncias explicadas para cada PSP obtido..... 102

Tabela A1 - Distribuição de frequências e média ponderada de dias com persistência de chuva acima de 1 dia, calculado para cada ponto de grade analisado sobre a SEB. 121

Tabela A2 - Distribuição de frequências e média ponderada de pontos com 4 dias de persistência de chuva, calculado para cada ponto de grade analisado sobre a SEB. 122

Tabela B1 - Valores médios do Oceanic Niño Index (ONI), classificação de intensidade do ENOS para a América do Sul, número de dias de chuva e de episódios para cada estação chuvosa analisada. 123

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AS	América do Sul
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
BCH	Baixa do Chaco
CAPE	Convective Avaliable Potencial Energy
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CI	Chuva Intensa
COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CP	Chuva Persistente
CPR	Componentes Principais
ECI	Episódio de Chuva Intensa
ECP	Episódio de Chuva Persistente
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ESRL	Earth System Research Laboratory
GrADS	Grid Analysis and Display System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
K	K index
LI	Lifted Index
NCEP	National Centers For Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONI	Oceanic Niño Index
PNMM	Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar
PSP	Padrão de Sequência Principal
RJ	Rio de Janeiro
SEB	Região Sudeste do Brasil
SF	Sistema Frontal

SP	Estado de São Paulo
SUL	Região Sul do Brasil
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCOU	Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivos 2
1.2 Objetivos específicos 2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 O Regime das Chuvas na SEB 3
2.2 Sistemas Meteorológicos da Estação Chuvosa da SEB 4
2.2.1 Sistemas Frontais 4
2.2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) 6
2.3 Estudos sobre chuva na SEB: Características e Padrões Sinóticos 8
3 DADOS E METODOLOGIA 15
3.1 Dados 15
3.2 Metodologia 17
3.2.1 Classificação dos Eventos de Chuva 18
3.2.1.1 Chuva Intensa 19
3.2.1.2 Chuva Persistente 20
3.2.2 Definição de Episódios de Chuva: ECI e ECP 21
3.2.3 Campos Compostos e Anomalias de Variáveis Atmosféricas 22
3.2.4 Padrões de Circulação Atmosférica 24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 27
4.1 Distribuição Mensal e Anual dos ECI e ECP 27
4.2 Características Sinóticas: Composições e Anomalias 32
4.2.1 Altos Níveis - 200 hPA 32
4.2.2 Médios Níveis - 500 e 700 hPa 35
4.2.3 Baixos Níveis - 850 e 925 hPa 39
4.2.4 Espessura 500/1000 hPa e PNMM 46
4.2.5 Sequência Temporal de Campos de Anomalias 48
4.2.6 Índices de Instabilidade 54
4.3 Padrões de Circulação Atmosférica 56
4.3.1 Padrões de Sequências Principais de ECI 58
4.3.2 Padrões de Sequências Principais de ECP 66
4.3.3 Ambiente Sinótico dos Padrões de Sequências Principais 74
4.3.3.1 Ambientes Sinóticos dos ECI 74
4.3.3.2 Ambientes Sinóticos dos ECP 81
4.3.4 Resumo: PSP e Ambientes Sinóticos 89
5 ESTUDOS DE CASOS 91
5.1 ECI - 13 de fevereiro de 2009 91
5.2 ECP - 13 à 16 de janeiro de 2007 94

6 CONCLUSÕES **99**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **115**
APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÕES DE FREQ. E MÉDIAS PONDERADAS **121**
APÊNDICE B – TABELA DE FASES DO ENOS Vs. ECI E ECP **123**
APÊNDICE C – COMPOSTOS DOS PSP DE ECI **125**
APÊNDICE D – COMPOSTOS DOS PSP DOS ECP **131**
APÊNDICE E – COMPOSTOS DOS CASOS ESTUDADOS DE ECI E ECP **137**

1 INTRODUÇÃO

A principal causa de desastres naturais no Brasil são os extremos meteorológicos. De acordo com Marcelino (2008), mais de 80% dos desastres são associados a instabilidades atmosféricas severas, sendo a Região Sudeste do Brasil (SEB) a mais afetada (40%). Prever as condições que podem resultar em desastres é um dos grandes desafios científicos atuais, pois envolvem diferentes áreas do conhecimento que devem ser tratadas em conjunto, como os aspectos meteorológicos, geológicos, ambientais e socioeconômicos. O estudo dos eventos de chuva, do ponto de vista meteorológico, considera diferentes aspectos, visto a complexidade que existe na geração e ocorrência do fenômeno, que pode envolver diferentes escalas temporais e espaciais. Aproximadamente 80% do total anual de precipitação da SEB ocorrem entre os meses de outubro até o final de março, em um período definido como a estação chuvosa da região. Nesta época, a SEB está sujeita a episódios de chuva intensa (ECI) que costumam ser o principal elemento deflagrador de um desastre natural. No entanto, sob determinadas condições, episódios de chuvas não necessariamente intensas, mas de caráter persistente (ECP), também podem produzir prejuízos à sociedade. De forma geral, um evento significativo de precipitação sobre a SEB decorre do desenvolvimento de sistemas atmosféricos de escala sinótica, como os sistemas frontais e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Estes sistemas podem se desenvolver e atuar a partir de diferentes configurações sinóticas que modulam a intensidade e a duração da precipitação sobre a SEB. Diversos estudos foram produzidos para incrementar o conhecimento e a climatologia destes fenômenos com o propósito de melhorar sua previsibilidade. Entretanto, a baixa destreza dos modelos numéricos na previsão quantitativa de chuva e a dificuldade de aplicação dos modelos conceituais de chuva à modelagem numérica, motiva a ampliação e aprimoramento de novos estudos associados a este tema. O conhecimento das situações causadoras dos ECI e ECP pode auxiliar o meteorologista na elaboração da análise e previsão de tempo e na implementação de ferramentas objetivas, derivadas da saída de modelos numéricos, que podem contribuir na previsibilidade além de otimizar o monitoramento de tempo e elaboração de alertas, uma vez que as chuvas intensas e persistentes podem ocasionalmente ocorrer com alto potencial destrutivo e causar diversos prejuízos à sociedade.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é caracterizar de forma comparativa, o ambiente e as situações em escala sinótica, presentes e precedentes à ocorrência de chuvas intensa e persistente, durante a estação chuvosa na Região Sudeste do Brasil.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar e selecionar os casos de chuva intensa e de chuva persistente através da elaboração e aplicação de respectivos critérios às séries climatológicas de dados diários de precipitação.
- Analisar e comparar as características sinóticas entre os campos associados com cada tipo de chuva.
- Obter os principais padrões de evolução dos sistemas meteorológicos associados a ocorrência de cada tipo de chuva.
- Reconstruir o ambiente sinótico de cada padrão obtido.

Este trabalho é dividido em 6 capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão de estudos antecedentes que fornecem embasamento para o desenvolvimento desta dissertação. O capítulo 3 apresenta os dados utilizados e explica a metodologia aplicada e desenvolvida durante o estudo. O capítulo 4 apresenta a contabilização dos episódios de chuva e discute os resultados obtidos a partir da aplicação das metodologias. Um estudo de caso para cada tipo de chuva é apresentado no capítulo 5. As conclusões deste trabalho são expostas no capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresentará uma revisão de estudos antecedentes com ênfase na escala sinótica.

2.1 O Regime das Chuvas na SEB

O regime de precipitação na SEB é caracterizado pelos períodos seco e úmido. O estudo de Alves et al. (2002) destaca que o início das chuvas na SEB concentra-se aproximadamente entre os meses de outubro a março, quando ocorrem mais de 80% do total anual. De forma geral, a precipitação ocorre como o resultado da atuação de duas principais perturbações atmosféricas do período: incursões de Sistemas Frontais, como as Frentes Frias e formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Os Sistemas Frontais que penetram sobre a SEB durante o verão são importantes, tanto para o início quanto para a manutenção dos eventos de ZCAS (LIEBMANN et al., 1999; ANDRADE, 2007), quando se associam com a convecção tropical, organizando este sistema desde o sul da Amazônia até o Atlântico Subtropical (OLIVEIRA, 1986; QUADRO, 1994). O período considerado seco consiste nos meses que compreendem as estações do outono e inverno, quando se registram baixos valores de precipitação. A diminuição da pluviometria durante o inverno é associada a atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que se situa mais a oeste e atua sobre a SEB, cujo padrão de circulação dificulta ou inibe a formação de nebulosidade. As chuvas ocorrem quando os Sistemas Frontais e Ciclones Subtropicais e Extratropicais conseguem se sobrepor ao ASAS. Outros sistemas como linhas de instabilidade pré-frontais, sistemas convectivos de mesoescala, bloqueios atmosféricos e brisas também atuam na região (REBOITA, et al., 2010).

Eventos de chuva intensa em geral, são marcados por apresentar elementos como grandes volumes de chuva, rajadas de vento, descargas elétricas, queda de granizo e entre outros que geram prejuízos à sociedade. A ocorrência de chuva em dias consecutivos, mesmo em pequenos volumes, também pode potencializar riscos, como os deslizamentos de terra em encostas montanhosas ou a inundação provocada pela extrapolação na vazão de rios. No final da estação chuvosa da SEB, por exemplo, desastres podem acontecer quando eventos de chuvas ocorrem em locais cujo solo já se encontra próximo da saturação ou já

saturado (SATYAMURTY et al., 2008). A simples sequência de dias com pequenos volumes de chuva podem potencializar os processos de escorregamento de massa.

De modo geral, a ocorrência de chuva intensa pode ser explicada pela interação de três ingredientes necessários: umidade, instabilidade e levantamento (DOSWELL, 1996). No entanto, quando estas condições se associam com um padrão de circulação atmosférica de escala maior, episódios de chuvas espacialmente amplas e intensas podem ocorrer, uma vez que sistemas atmosféricos de mesoescala, causadores de chuvas intensas, muitas vezes estão associados com características da escala sinótica (MADDOX et al., 1979; MADOXX; DOSWELL III, 1982).

Os aspectos estatísticos dos eventos extremos diários no Estado de SP foram investigados por Liebmann et al. (2001). No estudo, foi mostrado que entre outubro a março ocorre o maior número de dias com extremos de precipitação, relativo ao inverno.

Dereczynski et al. (2009) fez uma análise dos eventos de chuvas intensas utilizando 10 anos de dados observados para a cidade do Rio de Janeiro/RJ. A análise dos eventos de chuvas intensas indicou que, dos 160 casos selecionados, 77% foram provocados por sistemas frontais.

Ide e Macedo (2004) relacionaram os sistemas meteorológicos atuantes com eventos de escorregamentos com vítimas fatais no estado de São Paulo (1996-2004). Os autores concluíram que o sistema responsável pela maior parte das ocorrências foi a ZCAS, seguido pelas Frentes Frias.

Eventos de precipitação intensa ou persistente também ocorrem na SEB durante o período seco, embora em número e volumes inferiores em relação à estação chuvosa e geralmente restritos a uma pequena área da região.

2.2 Sistemas Meteorológicos da Estação Chuvosa da SEB

2.2.1 Sistemas Frontais

Os Sistemas Frontais, em especial as Frentes Frias, afetam o tempo sobre a América do Sul (AS) durante o ano todo. As frentes atmosféricas são zonas de fortes gradientes

térmicos horizontais, acompanhados por uma mudança acentuada na direção do vento e uma transição significativa no campo de umidade relativa (BLUESTEIN, 1993). Os sistemas provenientes do Pacífico deslocam-se para leste e adquirem uma componente em direção ao Equador após deslocarem-se pela Cordilheira dos Andes, podendo avançar pelo continente ou deslocar-se para o oceano Atlântico (SATYAMURTY et al., 1998, SELUCHI et al., 1998). No Brasil, as Frentes Frias atuam durante todo o ano (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009) e afetam mais significativamente as Regiões Sul e Sudeste, sendo responsáveis pelas chuvas. Andrade (2007) estudou a frequência de deslocamento dos sistemas sobre o Brasil (figura 2.1) e apontou a existência de um máximo secundário das frentes sobre o SEB durante a primavera austral. A autora destaca que na primavera e verão estes sistemas podem avançar pelo continente ou deslocar-se para o Oceano Atlântico.

Figura 2.1 - Gráfico da frequência sazonal de sistemas frontais no período entre 1980-2002 quanto ao deslocamento: Rota 1/SAS e oceano, Rota 1/Sul, Rota 1/Sudeste, Rota 2/SE e CO, Rota 1/SBA, Rota 2/SE, CO e SBA.
Fonte: Adaptado de Andrade (2004).

Durante o inverno, as Frentes Frias são acompanhadas de massas de ar de latitudes altas, que muitas vezes causam geadas e friagens em áreas agrícolas na SEB e na Região Sul do Brasil (SUL). Em várias ocasiões durante a primavera e verão, estes sistemas ao se deslocarem sobre a SEB vindo de latitudes subtropicais, interagem com a convecção tropical do continente sul americano e formam extensas bandas convectivas (OLIVEIRA, 1986; SIQUEIRA e MACHADO, 2004). Uma frente fria, ao interagir com a convecção na Amazônia, na presença da Alta da Bolívia e do Cavado do Nordeste, torna-se quase-estacionária, contribuindo significativamente para o regime de precipitação no SEB (OLIVEIRA, 1986). Nestas situações de estacionariedade dos Sistemas Frontais por mais de 3 dias, a banda convectiva, se estende desde o oceano Atlântico até o interior do continente, provocando chuvas em parte das Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte do

Brasil, caracterizando fenômeno de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (KOUSKY, 1988; KODAMA, 1992; QUADRO, 1994; CARVALHO et al., 2004). A figura 2.2 ilustra as configurações sinóticas médias dos campos atmosféricos associados aos deslocamentos de frentes frias no SEB durante o verão, os quais são semelhantes aos padrões de ZCAS, sobretudo no escoamento em altitude (250 hPa), pelo posicionamento da Alta da Bolívia e o Cavado do Nordeste.

Figura 2.2 - Campos compostos associados às frentes frias que se deslocam do Sul até o SEB durante o verão. Em (a), (b) e (c), PNMM e anomalia de ROL (sombreado); em (d), (e) e (f), escoamento e advecção de vorticidade em 500 hPa; em (g), (h) e (i), escoamento e magnitude do vento em 250 hPa. As sequências referem-se a dois e um dia que antecedem a chegada da frente ao SEB.
Fonte: Adaptado de Andrade e Cavalcanti (2004).

2.2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A ZCAS é um fenômeno meteorológico que ocorre durante a primavera/verão na AS e que contribui para o máximo de precipitação na porção central e leste do continente. É uma zona de intensa atividade convectiva, caracterizada pela convergência na baixa troposfera, que se estende por milhares de quilômetros, desde o sul da Amazônia até o setor centrossul do Oceano Atlântico e tem um papel fundamental na intensificação da precipitação sobre a SEB (KODAMA, 1992). Os Sistemas Frontais que penetram sobre o SEB durante o verão atuam na manutenção da ZCAS (ANDRADE, 2007), quando se associam com a convecção tropical, organizando este sistema desde o sul da Amazônia

até o Atlântico Subtropical (OLIVEIRA, 1986; QUADRO, 1994). O fenômeno é claramente caracterizado durante os meses de dezembro a março (NOGUÉS-PAEGLE e MO, 1997) e responsável por uma grande quantidade de chuvas em parte dos estados da Região Centro-Oeste e a SEB. A ZCAS pode ser identificada como uma banda de nebulosidade persistente (mais de 3 dias) orientada na direção noroeste-sudeste, estendendo-se desde o sul da região Amazônica até a região do Atlântico Sul (KODAMA, 1992; KOUSKY, 1988). As principais características desse sistema são a estacionariedade e a forte atividade convectiva associada com a convergência de umidade. A variabilidade na organização espacial e interescalar deste sistema influencia na intensidade das chuvas e na circulação atmosférica, podendo resultar na ocorrência de episódios extremos como o deslizamento de terras, alagamentos e entre outros. Mecanismos de mesoescala associadas à ZCAS, como a formação de Vórtices Ciclônicos de Mesoescala (QUADRO, 2012), também potencializam a ocorrência de intensa precipitação sobre as regiões afetadas.

Cita-se como características da ZCAS:

a) Alinhamento noroeste/sudeste da convergência do fluxo de umidade em baixos e médios níveis da troposfera.
b) Cavado na média troposfera, sobre a costa leste da América do Sul.
c) Gradiente de temperatura potencial equivalente (Θ_E) ao sul da faixa de nebulosidade.
d) Faixa de vorticidade relativa positiva (anticiclônica) em altos níveis.

Carvalho, et al., (2002) verificaram que a intensidade da ZCAS é importante para a modulação de eventos extremos no Estado de São Paulo (SP) e destacaram a importância da topografia na intensificação da atividade convectiva da ZCAS. Os casos extremos apresentaram uma circulação anticiclônica, em baixos níveis, sobre o Oceano Atlântico subtropical ocidental. A intensidade do sistema esteve diretamente ligada à advecção de umidade da Região Amazônica ao Centro-Oeste do Brasil e ao estado de SP. Em 2004 os autores também destacaram que ZCAS intensas são precedidas de propagação de distúrbios sinóticos nas latitudes médias, tais como as frentes frias.

2.3 Estudos sobre chuva na SEB: Características e Padrões Sinóticos

Seluchi e Chou (2009) estudaram os padrões de circulação presentes em dias com registros de deslizamentos de terra na Serra do Mar, no SEB. Mais de 80 % destes casos estiveram relacionados a sistemas de tempo de grande escala ou sinótica. A ZCAS e as passagens das Frentes Frias foram os principais sistemas produtores de chuva que causam deslizamentos. Um estudo detalhado de cada evento revelou que, em cerca de 50 % dos casos de ZCAS, a banda de precipitação foi localizada sobre SP por mais de 2 dias e ocorreram dentro de um padrão de ondas longas em altas latitudes, com uma crista sobre o Oceano Atlântico Sul e um cavado sobre o Oceano Pacífico Sul ocidental. Os Sistemas Frontais frios apresentaram-se mais intensos do que a média, assim como a instabilidade termodinâmica. A data dos deslizamentos coincide com o posicionamento de um cavado em 250 hPa sobre a região da Serra do Mar (figura 2.3).

Figura 2.3 - Diferenças entre campos de episódios de Frentes Frias: casos normais versus casos associados a deslizamentos. (a) PNMM (sombreado, hPa) e espessura 500/1000 hPa (linha sólida, m); (b) umidade específica (sombreado, g.kg-1) e vento (barbelas, m.s-1); (c) altura geopotencial-500 hPa (sombreado, m) e temperatura (linha sólida, K); (d) divergência de massa em 250 hPa (sombreado, 10-5s-1) e vento (ms-1).
Fonte: Adaptado de Seluchi e Chou (2009).

Os autores verificaram também a presença de um anticiclone em superfície sobre o Atlântico, com características típicas de bloqueio atmosférico. Condição que, aliada a circulação ciclônica nos níveis superiores nas latitudes subtropicais, modifica a posição da ZCAS deslocando para o sul de sua posição climatológica. Nas 24 horas antes dos eventos de deslizamento de terra, um cavado de onda curta em níveis superiores interage com a ZCAS, intensificando-a e deslocando-a em direção ao norte, próxima à da costa de SP (figura 2.4).

Figura 2.4 - Similar à figura 2.3.1, para episódios de ZCAS: casos normais versus casos associados a deslizamentos
Fonte: Adaptado de Seluchi e Chou (2009).

Lima et al. (2010) estudaram as condições de larga escala associadas a eventos de chuva normal e chuva intensa no SEB. O trabalho sugere que a frequência de chuva intensa associada às Frentes Frias é um pouco superior à associada a ZCAS. No entanto, os autores ressaltam da diferença na proporção de ocorrência entre os sistemas, pois, embora, a frequência de ZCAS seja baixa, o sistema em muitas vezes que se configura produz chuvas intensas. A razão para essa diferença é o caráter de estacionariedade da ZCAS, que pode permanecer com sua banda convectiva sobre uma determinada área por vários dias, enquanto que a banda convectiva da frente fria, por ser um sistema transiente, se afasta rapidamente, o que resulta em curtos períodos de chuva. A figura 2.5 ilustra as anomalias de Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (PNMM) entre os dois tipos de precipitação para os dois tipos de sistemas. Percebe-se que tanto para os casos de Frentes Frias quanto os de ZCAS, a maior magnitude dos sistemas está relacionada à ocorrência de chuva intensa, sendo que magnitudes ligeiramente maiores foram observadas nos casos de ZCAS.

Figura 2.5 - Compostos de anomalia de PNMM (em contorno cheio e tracejado) para: (a-d) casos de Frente Fria e (e-h) casos de ZCAS sobre o SEB; 2 dias antes (D-2) e o dia do evento (D0). A área sombreada representa nível de significância de 90 %.
Fonte: Adaptado de Lima et al. (2010).

A relação entre a ocorrência de precipitação significativa na SEB e a variabilidade dos sistemas sinóticos sobre a AS, motivou a realização de diversos estudos que visam classificar e quantificar os padrões de circulação associada a estes eventos.

Escobar e Carvalho (2005) analisaram a circulação atmosférica em superfície associada com eventos de ZCAS. Os autores utilizaram a metodologia de Análise de Componentes Principais (ACP) para identificar objetivamente os padrões de PNMM associados aos eventos (figura 2.6), e encontraram três modos principais de circulação atmosférica em

superfície; o primeiro associado a eventos ciclogenéticos no oceano Atlântico Sul, o segundo modo relacionado ao avanço de uma frente fria sobre a SEB e o terceiro a presença de um cavado no oceano Atlântico, na altura desta região.

Figura 2.6 - Padrões de PNMM associados aos eventos de ZCAS.
Fonte: Adaptado de Escobar e Carvalho (2005).

Teixeira (2010), ao estudar as características dos episódios de chuva intensa no Sul e Sudeste do Brasil, utilizou a ACP aos campos sinóticos de anomalias de PNMM, encontrando 5 padrões de anomalias para cada região (figura 2.7). A análise mostrou casos reais correlacionados positivamente e negativamente com os padrões. Os compostos dos casos positivos estiveram associados com forçantes fracas de escala sinótica, apesar da presença de movimento ascendente, substancial convergência de umidade em baixos níveis e divergência do escoamento em altos níveis em toda a região de estudo. Os casos negativos estiveram associados com forçantes significativas de escala sinótica, ao menos próximo da região. As diferenças entre os padrões estiveram basicamente associadas à posição dos centros de alta e baixa pressão observados a sudeste do continente.

Figura 2.7 - Padrões atmosféricos obtidos com a ACP-T aplicada aos campos de PNMM, dos dias de chuva intensa no SEB em todos os meses do ano. As séries temporais (gráficos abaixo) mostram a relação de cada padrão com os casos de chuva intensa (variâncias). As linhas tracejadas indicam a correlação de +- 0,7.
Fonte: Adaptado de Teixeira (2010).

Moura et al., (2013) analisaram a variabilidade dos Padrões de Sequências Principais (PSP) de PNMM e altura geopotencial em 500 hPa, associados a ocorrência de precipitação intensa na região metropolitana do Rio de Janeiro. Os autores aplicaram a ACP aos referidos campos, que possibilitaram identificar três PSP mostrados na figura 2.8:

a) PSP 1 - presença de uma frente fria durante o verão, com fraca componente de deslocamento meridional.
b) PSP 2 - penetração de uma frente fria com intensa advecção de ar frio, típica de inverno.

c) PSP 3 - lento deslocamento de um anticiclone ao longo de 35°S, geralmente associado a um bloqueio atmosférico.

Os autores também sugerem que, tanto o Padrão 1 quanto o Padrão 3 podem deflagrar eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Figura 2.8 - Três Padrões de Sequências Principais (PSP), de campos de PNMM correspondentes aos dias anteriores e ao evento de chuva (Dia -2, Dia -1 e Dia -0). (a) PSP-1, (b) PSP-2 e (c) PSP-3.
Fonte: Adaptado de Moura, et al. (2013).

Em estudo semelhante, Escobar (2014) identificou objetivamente cinco padrões de circulação mais frequentes para dezembro (figura 2.9). O autor verificou que o Padrão 3 teve maior associação com a anomalia positiva de precipitação em dezembro de 2011 no estado de Minas Gerais (MG):

a) O padrão 1 mostra uma configuração semelhante ao campo médio de verão, que é caracterizada por uma área de baixa pressão alongada sobre a AS, acoplada com um sistema transiente (frente fria ou cavado) mais ao sul.

b) O padrão 2 é associado a uma frente fria ao sul da SEB. Em certas ocasiões, este sistema fica estacionário por vários dias e organiza um canal de umidade se estendendo desde o oceano Atlântico até o sul da Região Amazônica, que configura um episódio de ZCAS.

c) Os padrões 3 e 5 são relacionados com uma configuração de bloqueio de tipo "dipolo" no oceano Atlântico, determinado por um anticiclone em torno de 50°W, 45°S e por uma baixa posicionada ao norte do anticiclone. Esta configuração determina um índice de circulação zonal baixo, que impede os transientes de avançarem para latitudes mais baixas. A experiência operacional mostra que este padrão de circulação em superfície está frequentemente associado com a presença de ciclones extratropicais fracos ou, em várias ocasiões ciclones subtropicais que atuam no oceano adjacente a SUL. Em várias oportunidades, estes padrões são associados a episódios de ZCAS.

d) O Padrão 4 é associado a incursão de uma frente fria na SEB, mais intensa que no Padrão 2.

Figura 2.9 - Cinco padrões de campos de PNMM correspondentes ao mês de dezembro. Fonte: Adaptado de Escobar (2014).

3 DADOS E METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada e os dados utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

3.1 Dados

A figura 3.1 mostra o domínio considerado para o estudo dos ambientes de escala sinótica associados aos eventos de chuva na SEB, entre as latitudes de 5°N/55°S e as longitudes de 20°O/100°O. Os dados de precipitação foram analisados em um domínio que compreende a SEB, entre 14°S/25°S e 39°O/53°O (figura 3.3).

Figura 3.1 - Domínio utilizado no estudo (azul) e região de interesse dos eventos de chuva (vermelho).

Os dados de precipitação provém do "PSD South America Daily Gridded Precipitation" (LIEBMANN; ALLURED, 2005), do NOAA/ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory). Este conjunto reúne dados de precipitação diária de diversas fontes da América do Sul, dispostos em pontos de grade, com resolução horizontal de 1° x 1°. A informação apresentada em cada ponto é uma média aritmética de dados, cujos postos de observação se encontram inseridos num raio de até 0.7° do ponto de grade. A figura 3.2 exemplifica o formato de apresentação dos dados.

Figura 3.2 Exemplo da estrutura de representação dos dados de precipitação diária, contida no PSD South America Daily Gridded Precipitation.

Foram analisados os dados diários de precipitação desde 1979 a 2010, dos meses que compreendem a estação chuvosa da SEB: outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março. As séries de dados foram extraídas de 40 pontos de grade sobre a região - figura 3.3 - e submetidos à análise para identificação, classificação e seleção dos episódios de chuva intensa e chuva persistente.

Figura 3.3 - Região Sudeste do Brasil (SEB) e os pontos de grade selecionados para a análise dos dados de precipitação.

Para a análise do ambiente de escala sinótica, foram utilizados dados da reanálise CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (SAHA, et. al., 2010), do NOAA/NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Esta é uma reanálise de alta resolução espacial, com superfície, atmosfera e oceano acoplados. Dentre as opções de resolução temporal e

espacial disponíveis, foram escolhidos para este estudo as versões de 0,5° e 2,5°, com reanálises em cada horário sinótico (00, 06, 12 e 18 UTC). A versão de 0,5 ° de resolução foi utilizado na geração de compostos e anomalias, enquanto que a de 2,5° foi utilizada para a Análise das Componentes Principais (ACP) dos campos de PNMM, a fim de obter os padrões de variabilidade espacial. Optou-se por utilizar os campos de reanálise da 00 UTC para a geração dos campos, por ser um horário mais próximo ao período da tarde e noite em que geralmente ocorrem as chuvas (21 BRT).

A geração e visualização dos campos de variáveis foi feita através do software Grid Analysis and Display System (GrADS), do Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions (COLA).

3.2 Metodologia

A metodologia deste trabalho fundamenta-se numa análise comparativa entre as características e situações sinóticas, presentes e precedentes aos eventos de chuva intensa e de chuva persistente na SEB. Na primeira etapa do estudo foram elaborados e definidos os critérios e condições que seriam aplicados às séries de chuva diária, para identificação e seleção dos casos, resultando em dois conjuntos: casos de *"Chuva Intensa"* (CI) e casos de *"Chuva Persistente"* (CP). Na segunda etapa, foram construídos campos compostos e de anomalias de variáveis para cada conjunto, com o propósito de ilustrar as características sinóticas e a magnitude das variáveis dos campos associados aos eventos. No entanto, uma vez que estes campos sintetizam apenas os dias de chuva, buscou-se investigar também as características nos dias antecedentes. Dessa forma, foram constituídos novos conjuntos denominados como *"Episódios* a partir dos casos identificados inicialmente. As análises por episódios são denominadas "*Episódios de Chuvas Intensas*" (ECI) e "*Episódios de Chuvas Persistentes*" (ECP). A análise por episódios permite analisar a evolução das situações sinóticas ao considerar os campos de três dias antecedentes ao início e os campos dos dias de chuva. Na terceira etapa um método estatístico foi aplicado aos conjuntos de campos de Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (PNMM) dos episódios, a fim de se obter os principais padrões de evolução dos sistemas sinóticos em superfície associados. Para cada padrão obtido foram reconstruídos os ambientes sinóticos dos demais níveis atmosféricos, através de campos

de interesse para o diagnóstico e prognóstico das chuvas. Na quarta e última etapa, um caso de cada tipo de chuva foi selecionado para estudo. A seguir serão detalhadas as metodologias desenvolvidas e aplicadas em cada etapa deste trabalho.

3.2.1 Classificação dos Eventos de Chuva

A definição de chuva "intensa", "extrema" ou "persistente" é bastante arbitrário. Vários autores utilizam a mesma denominação para representar eventos de chuva em diferentes escalas temporais e espaciais.

O Centro de Informações sobre Tempo Severo, da Organização Meteorológica Mundial (OMM), utiliza como limiar para chuva forte o valor de 50 mm / 24 horas (http://severe.worldweather.wmo.int/raindoc.html). Dolif e Nobre (2012) aplicaram este limiar para a seleção e estudo da previsibilidade de eventos extremos de chuva no Rio de Janeiro/RJ. Severo (1994) também utilizou o limiar para o estudo das chuvas intensas no Estado de Santa Catarina.

Outros estudos classificam como eventos intensos a ocorrência de determinados volumes em uma área específica. Junker et al. (1999) determinaram que um evento extremo de chuva deveria apresentar uma quantidade igual ou superior a 75 mm, em 24 horas com uma área média de aproximadamente 17.000 km². Teixeira e Satyamurty (2007) classificaram como eventos de chuva intensa no Sul do Brasil eventos nos quais a isoieta de 50 mm em 24 horas cobrisse uma área de no mínimo 10.000 Km².

Chaves e Cavalcanti (1999) definiram como eventos extremos aqueles com precipitação diária acima de 300 % da média diária climatológica e com persistência de 3 dias.

Liebmann et al. (2001) e Carvalho et al. (2002), ao estudarem a variabilidade interanual dos eventos de precipitação extrema diária no Estado de São Paulo (SP), definem como evento extremo aquele em que a precipitação diária excede em 20% de sua média sazonal ou anual.

Lima et al. (2010) compararam as diferenças na estrutura das perturbações atmosféricas entre eventos de chuvas intensas e eventos normais de precipitação. Como critério de seleção dos eventos, utilizou a análise de quantis (WILKS, 2006), também tratados como análise de percentis, sendo que para um evento ser intenso os valores diários de

precipitação deveriam ser iguais ou superiores ao Quantil de 99%. Os casos eram selecionados quando o critério era satisfeito em pelo menos 10 estações.

Moura et al. (2013) definiu como limiar de seleção o Quantil de 95%, ao estudar a ocorrência de chuva intensa na região metropolitana do RJ. O critério foi aplicado para nove estações distribuídas na cidade, de forma que se o valor de precipitação ultrapassasse o limiar em alguma delas, o caso era selecionado para o estudo.

3.2.1.1 Chuva Intensa

Diante dos antecedentes citados, este trabalho define como evento de *Chuva Intensa* (CI), a ocorrência simultânea de um valor de precipitação diária acima ou igual ao valor do Quantil de 99% da série de dados, em no mínimo 3 pontos de grade adjacentes entre si.

$$Chuva\ Intensa = P_D \geq q_m(0{,}99)$$

Onde

P_D : Dado de precipitação diária do ponto de grade;

$q_m(0{,}99)$: Quantil 99% dos dados diários para o mês em questão;

Em cada ponto de grade selecionado, analisa-se o Quantil 99% da série total de dados diários em cada mês, o que constitui seis limiares de chuva intensa diferentes, um para cada mês da estação chuvosa. A figura 3.4 exemplifica as possíveis adjacências entre 3 pontos de grade em relação ao ponto “15”. Levando-se em conta a abrangência espacial das observações e a resolução horizontal do conjunto de dados, a adjacência entre 3 pontos de grade garante a seleção de casos de ocorrência de chuva em uma área aproximada de 54000 km² sobre a SEB.

Figura 3.4 - Possíveis combinações de adjacência mínima entre 3 pontos de grade, relativa ao ponto "15".

3.2.1.2 Chuva Persistente

Define-se como evento de *Chuva Persistente* (CP) a ocorrência simultânea de valor de precipitação diária, contido em um intervalo de valores para *Chuva Persistente*, em no mínimo 3 pontos de grade adjacentes entre si e por 4 dias consecutivos:

$$Chuva\ \ Persistente = 1{,}2 * \overline{P}_{DM} \leq P_D < q_m(0{,}99)$$

Onde:

$1{,}2 * \overline{P_{DM}}$: Precipitação média diária do mês em questão, acrescida em 20% de seu valor;

P_D : Dado de precipitação diária do ponto de grade;

$q_m(0{,}99)$: Quantil 99% dos dados diários para o mês em questão;

Chuva Persistente: Condição satisfeita em, no mínimo, 3 pontos de grade adjacentes entre si e por quatro dias consecutivos;

• *Limiares de Chuva Persistente*.

Os *Limiares de Chuva Persistente* estabelecem o intervalo no qual o valor da precipitação diária deverá estar contido para que se configure um caso de persistência de chuva. O limiar mínimo é definido como a média diária mensal, acrescida em 20% de seu valor, e o limiar máximo fixado pelo Quantil 99%.

A determinação de quatro dias consecutivos de chuva foi baseada na média de dias consecutivos de precipitação, ponderada pela sua frequência de ocorrência em cada ponto de grade sobre a SEB. O valor médio calculado foi de **3,05** dias. Dessa forma, para a seleção de eventos acima da média, definiu-se que **4** dias consecutivos de chuva configura uma persistência. O histograma de frequências com os valores utilizados neste cálculo está disponível no Apêndice A deste trabalho.

3.2.2 Definição de Episódios de Chuva: ECI e ECP

Conforme mencionado anteriormente, os conjuntos de casos *Chuva Intensa* (CI) e *Chuva Persistente* (CP) sintetizam os dias em que as respectivas condições de chuva foram satisfeitas em pelo menos alguma área da SEB. Com o propósito de investigar os ambientes sinóticos antecedentes a esses eventos, foram constituídos os "*Episódios de Chuva*" a partir dos conjuntos de casos iniciais. A análise por episódios considera os três dias que antecedem e os dias de chuva, sendo identificados como *Episódios de Chuva Intensa* (ECI) e *Episódios de Chuva Persistente* (ECP), sendo que para este último são considerados também os campos de quatro dias de chuvas, correspondestes a quantidade de dias definido pelo critério de CP. A padronização do conjunto de casos como episódios implicou na eliminação de alguns dias consecutivos, que excediam aos definidos pelos respectivos critérios. Isso ocorreu em função da dimensão da área de detecção e pelo deslocamento de sistemas sinóticos causadores das chuvas, pois a condição era satisfeita várias vezes, em dias consecutivos em diferentes locais da região. Dessa forma, apenas os primeiros dias de chuva foram considerados na construção dos episódios, uma vez que o padrão sinótico que iniciava os eventos era o mesmo que conduzia à ocorrência dos subsequentes. Apesar da redução de dias, não se observou impacto significativo entre os resultados dos conjuntos *Chuva Intensa* e *Chuva Persistente* e os ECI e ECP. Para determinar o fim de um episódio e o início de outro, deve-se existir um intervalo mínimo

de 4 dias consecutivos sem que alguma condição de chuva seja satisfeita, em qualquer área da SEB e para ambos os conjuntos.

Os ECI e ECP são analisados na forma de campos compostos e de anomalias, dos três dias anteriores, o dia de início e dependendo do tipo do evento, um ou quatro dias durante o episódio de chuva, totalizando uma sequência de 4 dias para os casos de chuva intensa e de 7 dias para os casos persistentes:

a) D-n: identifica o campo do n-ésimo dia que antecede o dia do evento de chuva;

b) D 0: identifica o campo do dia do evento de chuva intensa ou do início da chuva persistente;

c) D+n: identifica o campo do n-ésimo dia de chuva (apenas chuva persistente, até n=3);

3.2.3 Campos Compostos e Anomalias de Variáveis Atmosféricas

A construção de campos compostos e de anomalias de variáveis atmosféricas possibilitou a análise dos ambientes sinóticos associados aos tipos de eventos e episódios de chuva. Como mencionado anteriormente, os compostos dos *eventos de chuva* consistem em apenas um campo, que é referente ao dia de ocorrência da chuva. Os compostos denominados por *episódios* são apresentados em uma sequência temporal, com três dias de antecedência e os dias dos eventos de chuva. Têm-se, portanto, uma sequência de quatro campos para os ECI e sete campos sequenciais para os ECP. As variáveis meteorológicas utilizadas foram pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM), altura geopotencial, temperatura, componentes zonal e meridional do vento, umidade específica, umidade relativa e dentre outras derivadas, em níveis atmosféricos mais representativos para o diagnóstico e prognóstico de precipitação. Foram também obtidos os compostos dos Índices de Instabilidade Convective Avaliable Potencial Energy (CAPE), Lifted Index (LI) e K Index (K). Os dois primeiros são disponibilizados através da Reanálise CFSR e o K Index foi calculado a partir dos compostos de temperatura e temperatura do ponto de orvalho, de acordo com a seguinte formulação:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + [Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})]$$

Onde T denota a temperatura do ar, Td a temperatura do ponto de orvalho e o subscrito o respectivo nível.

Os compostos para um dia determinado são basicamente a média aritmética dos campos de variáveis associados aos respectivos tipos de chuva, sendo definidos da seguinte forma:

$$\overline{\Psi}(x,y,z) = \frac{1}{N_{ec}} \sum_{j=1}^{N_{ec}} \Psi(x,y,z,j)$$

Onde:

Ψ = campo de uma variável qualquer;

$\overline{\Psi}$ = campo composto de uma variável qualquer;

(x,y,z) = posição espacial da variável;

N_{ec} = número total de dias de *chuva intensa* ou de *chuva persistente*;

j = refere-se ao j-ésimo dia de *chuva intensa* ou de *chuva persistente*;

As anomalias por sua vez foram obtidas, subtraindo-se a *climatologia ponderada* dos compostos. A *climatologia ponderada* é obtida da seguinte forma: dada uma variável qualquer, obtém-se a climatologia mensal desta e em seguida multiplica-se por um peso. O peso é definido como o <u>número mensal total</u> de dias de chuva *intensa* ou *persistente*. O produto resultante é então somado aos demais e dividido pelo <u>número total</u> de dias, respectivos aos tipos de chuva:

$$\overline{\Psi}c_{pond}(x,y,z) = \frac{1}{N_{ec}} \sum_{mes=1}^{mes=6} P_{mes} * \overline{\Psi}c_{mes}(x,y,z)$$

$$\Psi'(x,y,z) = \overline{\Psi}(x,y,z,) - \overline{\Psi}c_{pond}(x,y,z)$$

Onde:

Ψ' = campo de anomalia da variável;

$\overline{\Psi}c_{pond}$ = campo de *climatologia ponderada* da variável;

P_{mes} = peso de ponderação, definido pelo número *total mensal* de dias de chuva intensa ou persistente;

$\overline{\Psi}c_{mes}$ = campo climatológico mensal da variável;

São definidas, portanto, duas *climatologias ponderadas* distintas, uma para os conjuntos *Chuva Intensa* e ECI, e outra para *Chuva Persistente* e ECP. O objetivo desta ponderação é filtrar a variação sazonal, uma vez que as composições não são analisadas mensalmente, pois consideram todos os meses do período chuvoso. A não ponderação ressaltaria características sazonais que comprometeriam a análise comparativa entre os campos dos tipos de chuva.

3.2.4 Padrões de Circulação Atmosférica

O estudo dos padrões de circulação atmosférica tem como objetivo especificar os principais modos de trajetória e comportamento dos sistemas causadores de chuva sobre a SEB. Uma das formas de identificar o posicionamento e a trajetória de tais sistemas é feita pela análise dos campos de PNMM.

Dentre as metodologias para a estratificação de padrões atmosféricos, destaca-se a Análise de Componentes Principais Rotacionadas (ACP), com matriz de entrada em Modo-T. Este médodo é aplicado para classificar campos atmosféricos espaciais (COMPAGNUCCI; SALLES, 1997; ESCOBAR, 2007), e possibilita reproduzir padrões de circulação, quantificando sua frequência e mostrando os sistemas de tempo neles dominantes. A técnica foi aplicada aos campos de PNMM utilizando-se a aproximação definida por Compagnucci et al. (2001), que consiste na ACP de uma sequência de campos de variáveis associadas a algum tipo de evento meteorológico de interesse, obtendo como resultado os Padrões de Sequências Principais (PSP) destes campos.

Após a aplicação desta metodologia, as Componentes Principais (CPR) foram rotacionadas pelo método Varimax, cujo objetivo é redistribuir a variância total dos dados utilizados, uma vez que este processo facilita identificar o significado físico das CPR (RICHMAN, 1986). A variabilidade dos padrões pode ser determinada pelo cálculo da variância explicada, através dos *Factor Loadings* (RICHMAN, 1986), que apresentam os

valores de correlação entre as variáveis (campos reais) e as CPR (padrões). Assim, valores de *Factor Loadings* próximos a 1 indicam componentes principais similares aos campos reais. Os episódios *altamente correlacionados* são os que apresentam um valor de *Factor Loading* acima de 0,7 com alguma CPR. A partir destes episódios, foi reconstruído o ambiente sinótico associado, através de compostos que permitiram analisar as configurações de circulação atmosférica em níveis altos, médios e baixos em cada padrão.

Cada componente principal (CPR) representa um Padrão de Sequência Principal (PSP) de campos, ou seja, um conjunto sequencial de campos que retrata os principais modos de organização espacial dos campos de PNMM. Assim, os termos mencionados adiante como "Componente Principal" (CPR) e "Padrão de Sequência Principal" (PSP), são considerados sinônimos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresentará as distribuições mensais e anuais dos casos de chuvas intensa e persistente, as respectivas características sinóticas e os principais padrões de circulação associados.

4.1 Distribuição Mensal e Anual dos ECI e ECP

Ao analisar a magnitude média dos limiares mensais de chuva (figura 4.1), nota-se que os valores acompanham o desenvolvimento da estação chuvosa. As transições entre os períodos seco e úmido são marcadas pelos menores valores em outubro e março, meses que delimitam o início e o fim do período das chuvas, respectivamente. O auge situa-se entre dezembro e janeiro, onde, verificam-se os maiores limiares médios.

Figura 4.1 - Valores médios dos limiares de chuva por mês [mm], para cada tipo de evento de chuva.

A aplicação dos critérios de seleção descritos na subseção 3.2.1 permitiu identificar 200 dias (eventos) de *Chuva Intensa* (CI) e 1268 dias associados à eventos de *Chuva Persistente* (CP), durante a estação chuvosa da SEB no período de 1979 a 2010. Ressalta-se que o conjunto de 1268 dias representa todos os conjuntos de casos em que o critério de 4 dias consecutivos foi satisfeito, sendo contabilizados também os dias que excederam a este critério. A partir dos conjuntos obtidos, foram identificados os dias iniciais de cada evento e eliminados os dias excedentes aos critérios, o que possibilitou a construção dos *Episódios*. Os *Episódios de Chuvas Intensas* (ECI) são, portanto, caracterizados por 4

campos, e os *Episódios de Chuvas Peristente*s (ECP) por 7 campos. A tabela 4.1 resume as quantidades de dias considerados em cada análise.

Tabela 4.1 - Descrição dos conjuntos de casos de chuva, o método de análise e a respectiva quantidade de dias utilizados.

Nome do conjunto	Método de análise	Dias analisados	Número de episódios
(chuva) **Intensa (CI)**	Campo sinótico do dia do evento de chuva	200	-
(chuva) **Persistente (CP)**		1268	-
ECI *(Episódio de Chuva Intensa)*	Sequência temporal de campos sinóticos presentes e precedentes ao evento de chuva	133	133
ECP *(Episódio de Chuva Persistente)*		580	145

A distribuição mensal do número de dias de chuva intensa e de chuva persistente, exibidas nas figuras 4.2 e 4.3, apresentam uma relação inversa no decorrer dos meses analisados. A maioria dos casos de CI ocorrem em outubro, enquanto que as CP têm o seu mínimo de ocorrência nesse mês. Em janeiro, no auge do período chuvoso, ocorre a maioria dos casos de CP e o mínimo de CI. Em fevereiro o número de eventos apresenta um equilíbrio, quando em março tem-se um pequeno acréscimo de CP e uma discreta diminuição de CI.

Figura 4.2 - Distribuição dos dias de chuva por meses e número de datas organizadas como episódios (valores absolutos), para chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

Figura 4.3 - Comparações entre as distribuições mensais dos dias de chuva intensa e chuva persistente (valores percentuais).

Observou-se que 47% dos eventos identificados como de chuva intensa coincidiam com episódios de chuva persistente. Nestes casos, optou-se por considera-los apenas como Chuva Intensa, nos campos de análises que serão apresentados adiante. Entretanto, foi analisada a frequência de ocorrência deste tipo particular de evento, mostrada na figura 4.4. A frequência mensal dos casos de CI que ocorrem em eventos de CP apresenta comportamento similar à curva deste último tipo de chuva nos meses iniciais da estação chuvosa. A partir de janeiro, no entanto, verifica-se um decréscimo na frequência, que aumenta em fevereiro e atinge o máximo em março.

Figura 4.4 - Comparações entre os números de casos de chuva intensa, persistente e dos casos coincidentes de chuva intensa em eventos de chuva persistente (valores percentuais).

A figura 4.5 mostra a contabilização do sistema atmosférico causador da chuva em cada tipo de *Episódio*. A classificação elaborada com base em informações do Boletim Climanálise, editado pelo CPTEC/INPE, e com o auxílio de campos de PNMM, Espessura 500/1000 hPa e altura geopotencial em 500 hPa correspondentes. Em função

da disponibilidade do boletim, foram considerados apenas os episódios de chuva que ocorreram entre 1996 e 2010. A distribuição apresentada na figura 4.5 mostra que os ECI que não coincidem com ECP foram majoritariamente associados com a atuação de sistemas frontais sobre a SEB. No entanto, a ocorrência de chuva intensa em ECP (casos coincidentes CI em ECP), se dá principalmente em episódios de ZCAS. Os ECP também possuem associação com ZCAS e ao desenvolvimento de sistemas sinóticos oceânicos adjacentes à Região. Sugere-se que tais sistemas favorecem a convergência de umidade sobre a SEB e apresentam o padrão de circulação troposférico similar a ZCAS, mas que não são classificados como tal por não satisfazerem todos critérios, sendo muitas vezes denominados em ambiente operacional de previsão de tempo como "Zona de Convergência de Umidade" (ZCOU) (SACRAMENTO NETO, et al., 2010). Os sistemas foram classificados como:

a) **ND -** Sem um sistema sinótico definido.

b) **SF -** Sistema Frontal que atua sobre a SEB,

c) **SSO -** Sistema Sinótico Oceânico que atua de forma adjacente à SEB. Inclui Sistemas Frontais ou Não Frontais.

d) **ZCAS+SF** - Episódio de ZCAS simultâneo a atuação de um Sistema Frontal sobre a SEB

e) **ZCAS+SSO -** Episódio de ZCAS simultâneo a atuação de um Sistema Sinótico Oceânico adjacente à SEB

f) **ZCAS** - Episódio de ZCAS sem um sistema sinótico bem definido próximo à SEB.

Figura 4.5 - Contabilização do tipo de sistema atmosférico causador dos episódios de chuva entre 1996 e 2010 (valores percentuais).

Não se observou uma predominância entre a ocorrência de um ou outro tipo de evento de chuva em relação às respectivas distribuições anuais. A influência das fases positivas e negativas do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), na modulação do número de eventos de CI e CP, também foi avaliada, com base em informações do Oceanic Niño Index (ONI) para cada estação chuvosa (figura 4.6).

Figura 4.6 - Distribuição dos dias de chuva intensa, persistente (valores percentuais) e respectivos valores médios do Oceanic Niño Index (ONI), calculados para cada estação chuvosa analisada.

A partir de valores do ONI, obtidos para a região do Niño 3.4, calculou-se as médias semestrais correspondentes às estações chuvosas e correlacionadas com o número de ocorrências de CI e CP. A tabela 4.2 apresenta os valores de correlação entre o número de ocorrências para cada tipo de chuva e o valor médio do ONI.

Tabela 4.2 - Correlações entre números de dias de Chuva Intensa (CI), Chuva Persistente (CP) e valores médios do Oceanic Niño Index (ONI).

Correlações		
CI x ONI	CP X ONI	CI x CP
0,27	**0,23**	**0,21**

Os valores de correlação abaixo de 0,3, embora positivos, sugerem que não há uma relação bem definida entre a ocorrência do El Niño/La Niña e o número de eventos intensos ou persistentes de chuva definidos neste trabalho. Estudos antecedentes indicam que a precipitação na SEB possui fraca relação com as fases do ENOS. Grimm e Ferraz (1998) apontam que a pouca consistência das anomalias de chuva na SEB durante o fenômeno se deve justamente a localização da SEB em uma zona de transição entre os

sinais de efeitos do ENOS. Em estudo posterior, Grimm (2003) mostrou que anomalias positivas de chuva no mês de janeiro na SEB estão relacionadas com eventos de El Niño. No entanto, Teixeira (2010) sugere que tais anomalias não parecem estar relacionadas com uma maior quantidade de casos de chuva intensa na escala diária, tal como mostrado pelos baixos valores de correlação obtidos neste presente estudo. Entretanto, Hirata e Grimm (2015) verificaram que durante o verão, o El Niño apresenta influência positiva na modulação dos limiares extremos de chuva diária sobre a região, sobretudo na porção sul da SEB.

4.2 Características Sinóticas: Composições e Anomalias

A seção apresenta de forma comparativa, as composições relativas aos campos sinóticos dos dias de CI e CP, para os principais níveis atmosféricos. A escolha dos níveis, variáveis e campos derivados considerou suas relevâncias no âmbito do diagnóstico e prognóstico dos eventos de chuva.

4.2.1 Altos Níveis - 200 hPA

A figura 4.7 mostra, tanto para os casos de CI **(a)** quanto para os CP **(b)**, anomalias negativas de altura geopotencial no setor sudeste da AS. Percebe-se que a magnitude das anomalias é maior para os casos de CI em relação aos de CP. Ao sul de 30°S no domínio analisado, tanto no Pacífico, AS e Atlântico, nota-se ampla área de anomalia positiva de altura geopotencial em ambos os campos. As anomalias negativas de altura geopotencial indicam o predomínio de sistemas ciclônicos entre o SUL e a SEB durante a ocorrência das chuvas. Em altitude, a presença de cavados seriam os responsáveis pelo sinal negativo, ao passo que ao sul de 40°S a presença de cristas sobre estas regiões promoveriam os maiores valores relativos. Os campos anômalos de temperatura mostram um aquecimento sobreposto às anomalias negativas de geopotencial e um resfriamento entre o continente e o Atlântico, ao sul de 40°S. Chama a atenção o comportamento inverso entre variação da temperatura e a altura geopotencial neste nível, uma vez que são variáveis correlacionadas e suas magnitudes respondem de forma igual a variação do ambiente. No entanto, a peculiaridade presente neste nível justifica-se pela presença da camada de inversão térmica da tropopausa. Devido a amplitude das anomalias de altura

geopotencial, sugere-se que a presença de um sistema sinótico mais intenso em níveis mais baixos favoreça um forte resfriamento na média e baixa troposfera, que provoca a contração destas camadas e consequentemente o abaixamento da camada de inversão. O oposto ocorre em 50°S/50°O onde o resfriamento em altitude é provocado pela expansão das camadas inferiores em função do aquecimento.

Figura 4.7 - Campos de anomalias de altura geopotencial [mgp] (contorno) e temperatura [K] (sombreado) para o nível de 200 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

Na figura 4.8 percebe-se pelas linhas de corrente um padrão de escoamento formado por um anticiclone (Alta da Bolívia), centrado em 15°S/65°O, e um cavado (Cavado do Nordeste), com eixo posicionado em 10°S/25°O. As composições mostram o alinhamento de uma área de divergência média de massa positiva, desde o norte da AS, SEB e Atlântico. Nota-se que a dimensão da área de divergência positiva é mais extensa nos compostos de CI **(a)** e menores para os CP **(b)**. A divergência de massa é decorrente da difluência do escoamento anticiclônico da Alta da Bolívia em sua borda leste, na interface com o cavado. Por continuidade, a divergência induz a ascensão vertical das massas de ar em baixos níveis, que favorece dinamicamente a convecção. A presença desta configuração em altitude associada a um ambiente atmosférico termodinamicamente instável em baixos níveis, potencializa a ocorrência de convecção generalizada, produzindo nuvens e chuva espacialmente ampla.

Figura 4.8 - Compostos de vento horizontal (linhas de corrente) e divergência de massa (sombreado) [10-5.s-1] para o nível de 200 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

A figura 4.9 ilustra o escoamento típico do vento horizontal em altitude para os casos de chuva. Conforme descrito anteriormente, nota-se um padrão típico de verão, pelo predomínio da Alta da Bolívia no centro-oeste da AS e o Cavado do Nordeste sobre o Atlântico tropical (10°S/25°O). O campo de anomalia indica valores anômalos positivos sobre o sudeste da AS, Atlântico e áreas do norte e nordeste do continente. As anomalias negativas situam-se sobre o Atlântico, adjacente ao SUL e Argentina (30°S/70°O e 50°S/30°O). Para ambos os casos de chuva na SEB, enfraquecimento do escoamento ao sul e o fortalecimento ao norte sugere a presença de sistemas baroclínicos ao sul da SEB e Atlântico, uma vez que os Sistemas Frontais têm os Jatos em altitude associados, o que justifica as anomalias positivas. No entanto, os sinais positivos ao norte e nordeste da AS não parecem ter relação com processos baroclínicos, em decorrência de sua localização em baixas latitudes. As maiores magnitudes são observadas para os casos de CI **(a)**. Em relação aos casos de CP **(b)** a menor magnitude das anomalias positivas sugere que a persistência de chuva na SEB tem associada a presença de sistemas sinóticos comparativamente menos intensos e baroclínicos.

Figura 4.9 - Compostos (linhas de corrente) e anomalias de magnitude de vento horizontal (sombreado) [m.s-1] para o nível de 200 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

4.2.2 Médios Níveis - 500 e 700 hPa

Através da análise das isoípsas dos compostos da figura 4.10, verifica-se um cavado com eixo posicionado sobre o leste do SUL e SP para ambos os tipos de chuva. A curvatura das isoípsas sugere que para os casos de CI **(a)** os cavados apresentam maior amplitude do que em relação aos casos de CP **(b)**.

Figura 4.10 - Compostos de altura geopotencial [dmgp] para o nível de 500 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

As anomalias da figura 4.11 evidenciam as diferenças entre os campos de CI e CP pela presença de uma ampla anomalia negativa de altura geopotencial e de temperatura do ar, no nível de 500 hPa, para os casos de CI **(a)** sobre o SUL e a SEB, com valores centrais de -25 mgp. Notam-se anomalias positivas das mesmas variáveis ao sul das áreas comentadas, desde o Pacífico em 25°S/80°O, centrossul da Argentina e Atlântico Sul, em torno de 50°S. As distribuições dos sinais das anomalias são semelhantes entre os campos, com as maiores magnitudes associadas aos casos de CI. As anomalias dos campos de temperatura são coincidentes com as de altura geopotencial, pois são variáveis correlacionadas e suas magnitudes respondem de forma igual a variação do ambiente. O resfriamento e a queda de altura geopotencial retratada nas anomalias em níveis médios sugere a presença de cavados neste nível, corroborado pelos compostos de altura geopotencial mostrados anteriormente. As anomalias positivas ao sul do continente e sobre o Atlântico evidenciam um setor anomalamente aquecido, que reflete com o aumento de altura geopotencial. As anomalias negativas sugerem a presença de sistemas sinóticos, cuja dinâmica permite o levantamento (subsidência) do ar, que é resfriado (aquecido) devido à expansão (compressão) adiabática. Assim, anomalias negativas (positivas) sugerem o predomínio de sistemas de baixa pressão (alta pressão) nas composições dos tipos de chuva. Os padrões de anomalias de altura geopotencial em **(a)** são semelhantes em forma e magnitudes ao encontrado por Lima et al. (2010), em estudo

sobre padrões associados às chuvas intensas na SEB. Os autores relacionam tal configuração a um trem de onda bem definido sobre o Pacífico Sul e o sul da AS, com uma crista sobre a Argentina e o cavado sobre o SUL e a SEB. Seluchi e Chou (2009) verificaram que as anomalias positivas de altura geopotencial sugerem um padrão de bloqueio, caracterizado por um persistente centro de alta pressão que impede a propagação dos sistemas transientes sobre o Atlântico Sul e que está associado com episódios de ZCAS.

Figura 4.11 - Campos de anomalia de altura geopotencial [mgp] (contorno) e temperatura [K] (sombreado) para o nível de 500 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

A análise das características do vento horizontal em níveis médios é apresentada na figura 4.12. Percebe-se o reflexo do nível de 200 hPa na distribuição similar das anomalias, exceto pelos valores negativos sobre o setor norte do continente. Através das linhas de corrente é possível visualizar um padrão da presença do cavado entre o SUL e a SEB, associado com o fortalecimento do vento. As anomalias negativas ao sul sugerem que os sistemas baroclínicos situam-se a norte, sendo mais vigorosos para os casos de CI **(a)**. A anomalia negativa no campo de CP **(b)** mostra um enfraquecimento mais amplo e de menor magnitude ao sul do continente e Atlântico.

Figura 4.12 - Compostos (linhas de corrente e vetores) e anomalias de magnitude de vento horizontal [m.s-1] (sombreado) para o nível de 500 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

As composições dos campos de vento horizontal em 700 hPa para os tipos de ocorrência de chuva (figura 4.13), mostram um padrão de escoamento noroeste, desde o norte da AS (10°S/60°O), SEB e Atlântico Sul. As linhas de corrente evidenciam o formato de cavado em ambas as composições, sendo reflexo do ambiente presente em níveis elevados, como descrito na análise de 500 hPa. A presença do cavado sobre essas áreas favorece a canalização do escoamento de noroeste nos níveis baixos da troposfera. No composto dos casos de CI **(a)** o cavado possui maior amplitude, que reflete na maior intensidade observada dos ventos neste nível em comparação aos campos de CP **(b)**. A maior amplitude do cavado pode ser resultado da atuação de sistemas mais vigorosos no setor leste da AS para os casos de CI. O campo de umidade específica apresenta valores relativamente baixos em todo o domínio devido ao nível troposférico em questão, pois os volumes mais elevados encontram-se em níveis mais próximos à superfície. A característica do escoamento noroeste em 700 hPa parece estar associado ao deslocamento de sistemas frontais oceânicos que posicionam o fluxo sobre a SEB. Tal padrão de direcionamento é presente também em episódios de ZCAS.

Figura 4.13 - Compostos de vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e vetores) e umidade específica [10-3 g.g-1] (sombreado) para o nível de 700 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

4.2.3 Baixos Níveis - 850 e 925 hPa

O campo de anomalia de umidade específica em 850 hPa, ilustrado na figura 4.14, detalha as diferenças entre os ambientes sinóticos de CI e CP que não são claramente visíveis nos compostos de 700 hPa. Semelhante aos demais campos descritos, as distribuições das anomalias são similares, com menores (maiores) magnitudes associadas com os casos de CP (CI). Percebe-se que para os casos de CI **(a)** existe uma anomalia positiva de umidade específica, entre a porção centro-leste da AS e Atlântico, com maiores valores em 15°S/45°O. Em contrapartida, notam-se valores negativos ao norte da Argentina e áreas adjacentes, incluindo o SUL. Os valores negativos evidenciam a presença de uma massa com menor teor de umidade neste nível e delimita um forte gradiente ao sul da SEB, sendo um indicativo da presença de massas com características distintas. Tal configuração sugere a presença de frentes atmosféricas entre o SUL e a SEB, com características bem definidas nos casos de CI. Nos casos de CP os valores de anomalias são suavizados, o que leva a supor que nestes casos, a persistência da chuva esteja vinculada a sistemas frontais menos intensos ou, ainda, não frontais.

Figura 4.14 - Campos de anomalia de umidade específica [10-3 g.g-1] para o nível de 850 hPa, dos casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

De forma geral, os campos de temperatura potencial equivalente identificam locais marcados pela presença de massas de ar com características distintas, sendo úteis para a identificação de frentes atmosféricas. A figura 4.15 ilustra os campos anômalos da variável em 850 hPa para os tipos de chuva, com as maiores magnitudes definidas nos campos de CI. Em ambos os campos se observam anomalias negativas ao norte da Argentina e SUL, que coincidem com as anomalias negativas de umidade especifica, mencionada anteriormente. No sul da SEB existe a transição entre a anomalia negativa e positiva, que se estende ao norte da SEB e parte do NEB. Sobre o Atlântico adjacente à Argentina percebe-se a localização de outra região positiva. A presença do gradiente de anomalias próximo à SEB sugere que a produção de CI pode estar associada com a presença de Frentes ao sul, aproximadamente na divisa entre os estados de SP e MG. Nos casos de CP a mesma configuração é verificada em magnitude menor, sugerindo que a persistência de chuva possa ser associada à frente de fraca intensidade ou a sistemas não frontais.

Figura 4.15 - Campos de anomalia de temperatura potencial equivalente [K] para o nível de 850 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

Os compostos de convergência de umidade específica e vento em 850 hPa são mostrados na figura 4.16 e apresentam bastante semelhança entre si. A média dos campos sugere a presença de um vórtice em 20°S/50°O, que favorece a convergência do escoamento de noroeste e nordeste em direção à SEB. O vórtice é melhor definido, os ventos são mais intensos e a convergência de umidade específica é maior nos casos associados as CI **(a)**, de forma que reflete diretamente no aporte de umidade em baixos níveis na produção de chuvas significativas. As áreas de convergência neste nível coincidem com a presença de divergência positiva em 200 hPa, como descrito na análise da figura 4.8, que aliado ao ambiente úmido em baixos níveis indicam regiões favoráveis ao desenvolvimento de convecção e chuvas nas áreas da SEB.

Figura 4.16 - Compostos de convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] (sombreado) e vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e vetores) para o nível de 850 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

Na figura 4.17, percebe-se sobre o SUL e no extremo sul da SEB (20°S/60°O - 32°S/50°O) significativa anomalia positiva de vento horizontal com direção de sudeste em 850 hPa. A SEB é influenciada por ventos de diferentes regiões, sem uma predominância de anomalia para o campo de CI **(a)**. A magnitude das anomalias é menor para o campo de CP **(b)**, entretanto, percebe-se uma ampla área de enfraquecimento dos ventos sobre o Atlântico Sul para este caso, sinalizada apenas como um núcleo em 35°S/40°O no campo de CI. As linhas de corrente sugerem um padrão de escoamento anticiclônico intenso sobre o SUL, provocado por um anticiclone nos níveis inferiores. O enfraquecimento sobre o Atlântico Sul sugere que os sistemas sinóticos de latitudes médias podem ser menos intensos nestas áreas na ocorrência de CP na SEB.

Figura 4.17 - Compostos (linhas de corrente e vetores) e anomalia de magnitude de vento horizontal [m.s-1] (sombreado) para o nível de 850 hPa. Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

Os compostos **(a)** e **(b)** da figura 4.18 não mostram claramente uma diferença entre os campos de temperatura em 925 hPa dos tipos de chuva. A configuração das isotermas sugerem temperaturas discretamente mais baixas sobre a SEB nos casos de CI **(a)**. Como reflexo na influência dos padrões em níveis médio e altos, nota-se ampla anomalia negativa de temperatura no nível de 925 hPa, ilustrados pelos compostos dos casos de chuva intensa **(c)** e persistente **(d)**. A distribuição espacial das anomalias é similar aos demais níveis, com valores positivos ao sul de 30°S no Pacífico, Argentina e Atlântico adjacente, e negativos sobre o sudeste da AS. Embora em níveis superiores o resfriamento da camada possa ser relacionado a dinâmica de levantamento de um cavado, em níveis mais baixos como 925 hPa é provável que tal resfriamento não seja atribuído totalmente a este mecanismo. Neste caso, a advecção de uma massa de ar relativamente mais fria justificaria tal sinal anômalo. Na hipótese da ocorrência de sistemas frontais neste setor, os anticiclones migratórios que acompanham o deslocamento das frentes frias poderiam ser os responsáveis pela advecção. Cita-se também, em uma proporção menor, os efeitos de uma possível atenuação radiativa proporcionada pela cobertura de nuvens causadoras de chuva, o que levaria a considerar também os efeitos diabáticos dos processos convectivos. Em contrapartida, no caso do aquecimento anômalo ao sul do continente, o mecanismo dinâmico parece favorecer majoritariamente o aumento de temperatura pela subsidência e compressão adiabática da massa de ar. As anomalias positivas de

temperatura e altura geopotencial também são verificadas em níveis médios, o que sugerem a presença de sistemas anticiclônicos, cuja dinâmica favorece o aquecimento das massas de ar, além de dificultar a formação de nebulosidade.

Figura 4.18 - Compostos de temperatura do ar [ºC] em 925 hPa e as respectivas anomalias (painéis inferiores), para os casos de chuva intensa (a, c) e chuva persistente (b, d).

Os compostos de água precipitável na figura 4.19 **(a)** e **(b)** apresentam valores em torno de 40 mm em grande parte da SEB. Os campos de anomalias ilustram sinais semelhantes

ao observado no campo de umidade específica para 850 hPa (figura 4.14), sendo caracterizadas por valores abaixo da média ao norte da Argentina, SUL e áreas adjacentes. São características esperadas, uma vez que o campo de água precipitável advém da umidade específica integrada em toda coluna troposférica, sendo que a maior quantidade de umidade está contida nas camadas que compreendem os baixos níveis. Os campos de anomalias entre CI **(c)** e CP **(d)** são similares, com maiores magnitudes e contrastes presentes nos campos de CI. Percebe-se que as anomalias positivas sobre a SEB são mais amplas para CI mas apresentam mesma intensidade para CP, com valores anômalos médios da ordem de +4 mm para ambos os casos. O sinal negativo das anomalias parece diferir mais em relação aos sinais positivos, assim como o observado também na análise de umidade específica em 850 hPa, com valores abaixo de -4 mm para CI e -2 mm para CP.

Figura 4.19 - Compostos de água precipitável [mm] e as respectivas anomalias (painéis inferiores), para os casos de chuva intensa (a, c) e chuva persistente (b, d).

4.2.4 Espessura 500/1000 hPa e PNMM

De forma similar às análises anteriores, as magnitudes das anomalias da figura 4.20 são maiores para os casos de CI **(a)** e menores para CP **(b)**. Em relação às anomalias de PNMM, destaca-se que região de valores negativos mostra a predominância de áreas de baixa pressão sobre o leste da SEB e Atlântico adjacente, na ocorrência de ambos os tipos de chuva. O campo de anomalia de espessura apresenta uma região negativa, imediatamente a sudoeste da região negativa de PNMM, comentada anteriormente. Ao sul da AS e Atlântico verificam-se as anomalias positivas, que são mais abrangentes para

os casos de CI. As anomalias de espessura apresentam, de forma geral, as mesmas características que as observadas nas anomalias de altura geopotencial e temperatura em 500 hPa (figura 4.11). A partir da sobreposição entre os campos anômalos de PNMM e espessura 500/1000 hPa, percebe-se que as anomalias negativas sugerem a presença de sistemas sinóticos como os sistemas frontais, cuja dinâmica permite o levantamento do ar e, por consequência, o resfriamento das camadas na baixa e média troposfera. Os sinais positivos indicam uma camada anomalamente mais aquecida e associada também com um aumento anômalo de pressão em superfície, evidenciando áreas de alta pressão, possivelmente provocadas pela presença de anticiclones. Tais sistemas, neste caso, parecem ser mais vigorosos para CI do que para CP. Percebe-se que as anomalias positivas de PNMM associadas a CP são definidas de forma ampla sobre o Atlântico Sul, enquanto que em CI se observa um núcleo de maior valor em uma área relativamente menor em torno de 40°S. Lima et al. (2010) identificou um padrão semelhante de anomalias de PNMM sobre a AS, associadas a casos de CI originadas por frentes frias e ZCAS, sendo que os valores de maior magnitude estiveram associados a este último sistema. No entanto, vale ressaltar que o presente trabalho não faz distinção entre frentes frias e ZCAS nas composições.

Figura 4.20 - Campos de anomalias de espessura 500/1000 hPa [mgp] (sombreado) e anomalias de PNMM [hPa] (contorno). Casos de chuva intensa (a) e chuva persistente (b).

4.2.5 Sequência Temporal de Campos de Anomalias

A figura 4.21 apresenta os campos sequenciais de anomalias para vários níveis, associados aos ECI. Na sequência do nível de 200 hPa (a), conforme destacado anteriormente, as anomalias de temperatura respondem de forma inversa às de altura geopotencial. As anomalias positivas de altura geopotencial, associadas com anomalias negativas de temperatura neste nível, ampliam-se e propagam-se para leste, desde o dia -3 ao sul de 40°S no Pacífico, até ao sul de 40°S no Atlântico, estendendo-se inclusive sobre o sul do continente sul-americano. Simultaneamente, as anomalias negativas de altura geopotencial situadas no dia -3 Sobre o Atlântico 30°S, adjacente ao sudeste da AS, amplia-se nos dias -2 e -1 com a formação de um núcleo secundário ao sul de 40°S associado a um forte aquecimento anômalo que se propaga para leste. No dia 0, o padrão define-se com o núcleo negativo de altura geopotencial sobre o SUL e Atlântico. A relação inversa entre a temperatura e geopotencial pode ser atribuída ao declínio do nível da camada de inversão térmica da tropopausa. A queda acentuada de altura geopotencial, evidenciado pelos sinais das anomalias, sugere a presença de um sistema sinótico mais intenso que favoreça a um forte resfriamento na média e baixa troposfera, que resulta na contração destas camadas e consequentemente a queda de nível da tropopausa. O resfriamento é visível em níveis médios (500 hPa) (b), cujas sequências ilustram anomalias negativas de temperatura que se intensificam sobre o Atlântico Sul, nos dias -2, -1 e definem-se entre o sudeste da AS e Atlântico no dia 0. Com exceção do campo de temperatura em 200 hPa, as características na evolução das anomalias são semelhantes entre os níveis analisados e também são observadas em 500 hPa (b), no campo de espessura 500/1000 e refletem nos padrões anômalos de PNMM (c). O campo combinado de Espessura 500/1000 e PNMM sintetiza as características sinóticas presentes nos demais níveis, bem como as influências em superfície. As anomalias negativas de PNMM em conjunto com as de espessura sugerem a propagação ou o desenvolvimento de sistemas frontais, tais como as frentes frias e os ciclones extratropicais. De acordo com Gan (1991) e Guia (2010), as regiões preferenciais de formação e geração de ciclones situam-se ao leste da Argentina, sudeste da AS e, durante o verão austral, sobre o Atlântico adjacente à SUL e SEB. A gênese destes sistemas produz forte convergência de umidade específica em baixos níveis sobre a SEB, que favorecem a ampla ocorrência de precipitação. Assim, tanto o deslocamento de frentes quanto a formação de ciclones refletem na anomalia negativa de PNMM adjacente à SEB. O resfriamento anômalo da

camada de espessura 500/1000 hPa sobre o SUL e Atlântico, sugere que o desenvolvimento de sistemas mais baroclínicos que a média estejam vinculados à ocorrência de CI na SEB. As anomalias positivas de PNMM e espessura refletem no predomínio de sistemas de alta pressão mais vigorosos ao sul de 40°S entre o continente e o Atlântico. Supõe-se que os sinais estejam mais relacionados ao deslocamento de anticiclones migratórios mais intensos, devido ao caráter transiente dos sinais positivos, embora, também possa estar relacionada às altas de bloqueio sobre o Atlântico Sul.

Figura 4.21 - Sequências de campos de anomalias dos Episódios de Chuvas Intensas (ECI). Anomalias de temperatura [K] (sombreado) e altura geopotencial [mgp] (contorno) para o nível de 200 hPa (a) e em 500 hPa (b); anomalias de espessura 500/1000 [mgp] (sombreado) e de PNMM [hPa] (contorno) (c).

As sequências apresentadas na figura 4.22 são similares às anteriores, para os ECP. Em 200 hPa **(a)**, as anomalias mostram um padrão similar ao verificado nos ECI. Nos dias antecedentes às chuvas (dias -3 -2 e -1), percebe-se a propagação para leste dos sinais de anomalias ao sul de 45°S, compostos por um forte sinal negativo (positivo) de altura geopotencial (temperatura), sobre o Atlântico 50°S (Pacífico 50°S). Durante os dias de chuva na SEB (dias 0, 1, 2 e 3), define-se uma área com valores positivos (negativos) de altura geopotencial (temperatura) sobre o sul do continente e os oceanos adjacentes. Simultaneamente, valores negativos de anomalia de geopotencial se estabelecem entre o sudeste da SEB e o Atlântico, com destaque no dia 3 quando surge um aquecimento anômalo sobre o oceano. Conforme explicitado na análise anterior, neste nível os valores entre temperatura e altura geopotencial parecem responder de forma inversa às variações do ambiente, provavelmente devido a presença da camada de inversão térmica da tropopausa neste nível. A magnitude das anomalias é menor para os casos de ECP em comparação com os de ECI, embora a localização e a evolução dos sinais sejam semelhantes. Na sequência **(b)** para o nível de 500 hPa, observa-se no dia -2 a formação de sinais positivos e negativos de anomalias para ambas as variáveis em torno de 50°S. Os sinais intensificam e deslocam-se para leste no dia -1. Durante o primeiro dia de chuva (dia 0) percebe-se o resfriamento anômalo da camada próximo ao sudeste da AS, que reflete no campo de anomalia de altura geopotencial e persiste nos demais dias da sequência sobre as áreas mencionadas. As anomalias positivas de temperatura definem-se ao sul de 40°S sobre o Pacífico, AS e Atlântico, com maior e menor magnitude nos dias 0 e 1, 2 e 3, respectivamente. Nota-se similaridade entre campos de anomalia do dia 0 dos ECI e o dia 3 dos ECP, embora a magnitude para este último seja menor. Os campos da sequência **(c)** sintetizam as características observadas nos níveis médios e baixos, que refletem no campo de anomalia de PNMM. Nos dias -3, -2 e -1, nota-se a formação e deslocamento para leste dos sinais anômalos de PNMM e espessura. No dia -1 e 0 há um predomínio dos valores positivos ao sul de 40°S, quando no dia 0 (início das chuvas) têm-se uma anomalia negativa de PNMM em uma área em torno de 25°S/30°O, que engloba o sudeste da AS e o Atlântico. Um gradiente de anomalias de PNMM define-se a partir do dia -1 entre o norte da Argentina, Uruguai e Atlântico, associados com anomalia negativa de espessura também nestas áreas. O padrão desloca-se para norte e permanece sobre o SUL durante os dias de chuvas na SEB. Como reflexo dos níveis superiores, percebe-se similaridade entre o posicionamento das anomalias dos ECP e dos ECI, porém, menos intensos e mais duradouros nos ECP. Os campos de altura geopotencial e

espessura, respondem aos sinais de anomalias de forma similar ao campo de temperatura em **(b)** e **(c)**, por serem variáveis inter-relacionadas. O sinal positivo destas anomalias são reflexos de uma camada atmosférica aquecida que predomina ao sul do continente e oceanos adjacentes, para ambos os tipos de chuvas, porém, em menor magnitude quando comparados aos campos de ECI. No entanto, a anomalia positiva de PNMM é melhor definida em 50°S sobre o Atlântico e Pacífico para os ECP. De forma geral, as sequências ilustram processos sinóticos que se propagam de forma mais lenta para norte/nordeste em comparação aos campos de ECI. Adicionalmente, o deslocamento para leste dos sinais anômalos ocorre mais ao sul e de forma menos intensa para os ECP. Este comportamento sugere que, a propagação de um distúrbio sinótico vigoroso ao sul de 50°S fortalece um ambiente baroclínico sobre o sudeste da AS a partir do dia -1, persistindo até o dia 1 e intensificando-se no dia 3, possivelmente como resultado da formação de um sistema secundário. Embora a distribuição dos sinais anômalos seja semelhante, a magnitude inferior das anomalias em comparação aos campos de ECI sugere que os sistemas sinóticos causadores das chuvas apresentem características pouco baroclínicas, sendo atribuídas a sistemas frontais ou não frontais. Conforme descrito anteriormente, as anomalias negativas de PNMM sobre a SEB e Atlântico adjacente podem ser reflexos de frentes ou a formação de ciclones neste setor. A menor magnitude das anomalias de temperatura e geopotencial evidenciam que os sistemas sinóticos associados com CP apresentem características pouco baroclínicas, em função do fraco gradiente térmico associado, o que leva ao desenvolvimento de ciclones com características extratropicais fracas ou eventualmente subtropicais. As anomalias positivas ao sul dos domínios podem ser atribuídas à sistemas de alta pressão (anticiclones) no Pacífico e no Atlântico, ao sul da baixa pressão adjacente à SEB, que podem ser associadas a situações de bloqueio, descrito por Seluchi e Chou (2009) em estudo sobre o padrão sinótico em eventos de ZCAS. Tal característica bloquearia eventuais sistemas transientes de latitudes média que poderiam favorecer a mudança do padrão adjacente às SUL e SEB. Uma vez que o padrão associado às chuvas persista, configura-se um ECP na SEB.

Figura 4.22 - Similar à figura 4.21, para os Episódios de Chuvas Persistentes (ECP).

4.2.6 Índices de Instabilidade

A figura 4.23 apresenta os compostos dos índices de instabilidade CAPE **(a)**, K **(b)** e LI **(c)**. De forma geral, percebe-se um ambiente termodinamicamente instável sobre a metade norte da AS, com valores significativos dos índices alinhados desde o norte do continente à SEB e Atlântico sul. As características revelam ambientes propícios a atividade convectiva tanto para CI quanto para CP. Embora sobre a SEB o Índice CAPE não apresente diferenças entre as anomalias para os tipos de chuva, nota-se, a partir dos compostos, que o índice apresenta maiores valores médios para os casos de CP, possivelmente influenciado pela maior disponibilidade de vapor d'água e pelas temperaturas elevadas na baixa troposfera, uma vez que a maioria dos casos de CP ocorre durante o verão, entre dezembro e janeiro. Apesar dos compostos serem filtrados, tais características parecem ter sido ressaltadas nas composições. Nos campos de CI, a anomalia negativa é bem demarcada entre o SUL e o sul da SEB, enquanto que o sinal é suavizado em CP. Os valores negativos indicam a redução do potencial convectivo, supostamente provocado pela presença de uma massa de ar mais estável neste setor. A anomalia negativa também é bem definida para CI no índice K, e aparece com valores positivos no composto de LI. Os valores positivos de LI indicam um fraco potencial de levantamento da parcela de ar, em função da diferença de temperatura no nível de 500 hPa e a parcela, elevada adiabaticamente desde superfície. Assim, para este setor, considera-se que os padrões de anomalia descritos sejam reflexo da presença de uma massa de ar estável, mais seca e fria do que os arredores bem definidos nos casos de CI. Sobre a SEB e Atlântico adjacente, os valores médios de 30 para índice K e -2 para LI, evidenciam um ambiente favorável ao desenvolvimento de convecção que conduzem à ocorrência das chuvas. As anomalias positivas de K concentram-se sobre o leste da SEB e são mais amplas para os casos de CI, embora a magnitude do valor seja praticamente a mesma para ambos os tipos de chuva. As anomalias negativas de LI, que indicam um ambiente mais propício à formação de instabilidades, também não diferem muito entre CI e CP, exceto o gradiente de anomalias, que é melhor definido para os casos de CI.

Figura 4.23 - Compostos de Índices de Instabilidade e as respectivas anomalias (painéis inferiores): CAPE [J.Kg-1] (a), Índice K (K) (b) e Lifted Index (LI) (c). Figuras ímpares e pares são para os casos de Chuva Intensa e Chuva Persistente, respectivamente.

4.3 Padrões de Circulação Atmosférica

Uma vez elucidadas as diferenças e as características sinóticas entre CI e CP, esta seção abordará a variabilidade e os principais modos de organização espacial dos sistemas sinóticos que favorecem a ocorrência dos tipos de chuva sobre a SEB. Os principais padrões foram obtidos através da Análise de Componentes Principais Rotacionadas, com matriz de entrada em Modo-T (ACP), dos campos sequenciais de PNMM dos ECI e ECP. A partir da aplicação da ACP foram obtidas 9 componentes principais (CPR) para ambos os tipos de episódios. A ordem das CPR é definida de acordo com os percentuais de variância explicada, de modo que o maior valor percentual é atribuído à 1ª CPR.

As CPR dos ECI explicam 82,61% da variância total da variabilidade espacial dos campos, enquanto que para os ECP a porcentagem total foi de 77,86 %. A tabela 4.3 informa os valores de variância explicada para cada componente.

Tabela 4.3 - Resumo das porcentagens de variância explicada pelas nove componentes principais obtidas para cada tipo de episódio. Em destaque as cinco primeiras consideradas para a análise, devido às maiores porcentagens de variância total.

Componente	Variância explicada (%)		Var. acumulada (%)	
	ECI	ECP	ECI	ECP
1ª - CP1	21,74	20,33	21,74	20,33
2ª - CP2	18,99	16,13	40,73	36,46
3ª - CP3	18,05	14,76	58,78	51,22
4ª - CP4	7,58	7,05	66,36	58,27
5ª - CP5	6,69	4,99	73,05	63,26
6ª - CP6	2,72	4,79	75,77	68,05
7ª - CP7	2,4	4,05	78,17	72,1
8ª - CP8	2,28	3,73	80,45	75,83
9ª - CP9	2,16	2,03	82,61	77,86
TOTAL	**82,61**	**77,86**	**82,61**	**77,86**

Nota-se que os valores de variância explicada a partir da 5ª CPR são muito baixos em comparação com os demais. Os valores baixos de variância representam padrões pouco frequentes, embora significativos, que podem até serem correlacionados com apenas um caso real ou um pequeno conjunto de padrões similares entre si. Quanto menor a variância

explicada, mais "ruidosas" tendem a ser os padrões, o que dificulta a interpretação do significado físico. Por estas razões, foram selecionadas apenas as cinco primeiras, pois além de explicarem maior porcentagem de variância, possuem um número razoável de casos *altamente correlacionados*, o que tornou possível a reconstrução do ambiente sinótico associado a cada padrão. Assim, considerando as cinco primeiras CPR, estas explicam 73,05 % da variância total dos ECI e 63,26 % dos ECP.

A interpretação do significado físico das CPR é possível através da comparação com as respectivas sequências de campos *altamente correlacionadas,* que são sequências de campos de PNMM dos episódios de chuva que possuem alta correlação – igual ou acima de 0,7 - com alguma CPR. Para a geração de compostos relativos aos padrões 4 e 5, admitiu-se episódios com valores de correlação a partir de 0,55, uma vez que estas CPR possuem poucos episódios *altamente correlacionados.*

Tabela 4.4 - Número de episódios altamente correlacionados com as respectivas componentes principais, utilizados na elaboração dos compostos.

Número de dias altamente correlacionados		
Componente	**ECI**	**ECP**
1ª - CP1	16	15
2ª - CP2	14	15
3ª - CP3	13	14
4ª - CP4	6	6
5ª - CP5	4	3
TOTAL	**53**	**53**

Para auxiliar a visualização dos sistemas meteorológicos, foram demarcadas as posições aproximadas dos sistemas com base na configuração das isóbaras, o campo de espessura e com o auxílio dos compostos de variáveis atmosféricas dos demais níveis, que estão disponíveis e podem ser consultados nos Apêndices C e D deste trabalho. A figura 4.24 apresenta os símbolos utilizados nas demarcações.

Figura 4.24 - Legenda dos sistemas meteorológicos demarcados.

Os padrões foram nomeados de acordo com o processo ou a configuração sinótica ilustrada que esteve associada a ocorrência de precipitação sobre a SEB. As figuras das subseções 4.3.1 e 4.3.2 apresentam a plotagem das CPR, os compostos de PNMM dos episódios altamente correlacionados e o gráfico dos *Factor Loadings*, que informa o grau de correlação entre cada episódio e as CPR.

4.3.1 Padrões de Sequências Principais de ECI

O 1º PSP de ECI é denominado como *"Sistema Sinótico Oceânico",* baseado na 1º CPR apresentado na figura 4.25 **(a),** que explica 21,74% da variância total dos campos, e representa a configuração sinótica mais frequente associado ao fenômeno de estudo. A análise dos compostos de PNMM **(b)** mostra os Anticiclones Subtropicais do Pacífico Sul (ASPS) e Atlântico Sul (ASAS) posicionados em torno de 35°S/90°O e 30°S/20°O respectivamente. Na sequência apresentada, os sistemas transientes deslocam-se preferencialmente ao sul dos anticiclones subtropicais. Nota-se uma área de baixa pressão sobre o continente, em torno de 65°O/23°S, que caracteriza a Baixa do Chaco (BCH), cuja presença é bem definida durante o verão austral (Seluchi, 2012). Na sequência de campos, percebe-se o deslocamento de uma frente fria sobre o Oceano Atlântico, em torno de 40°S/40°O, simultâneo à formação de uma área de baixa pressão adjacente à SEB entre os dias -2 e -1. No dia 0 o sistema aparenta uma estacionariedade entre o SUL e o Atlântico, podendo também ser interpretado como um enfraquecimento neste setor, de modo que favorece a presença de um cavado entre a SEB e o oceano.

O 2º PSP de ECI é denominado *"Sistema Frontal"* e representa o 2º padrão de processos sinóticos mais frequentes associados aos ECI, baseado na 2º CPR - figura 4.26 **(a) -** que explica 18,99% da variância dos campos. A partir da análise dos compostos **(b)**, percebe-

se a formação de uma frente fria no dia -2, que se desloca desde a Argentina, Uruguai e SUL, alcançando a SEB no dia 0. Observa-se um anticiclone migratório que surge do despendimento de uma crista do ASPS no dia -2, e que acompanha o deslocamento da frente fria, mas se posiciona sobre o Atlântico em 40°S/50°O no dia 0.

O 3º PSP de ECI é denominado *"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"* e baseia-se na 3ª CPR, apresentada na figura 4.27 **(a)**, que explica 18,05% da variância total. A configuração sinótica apresentada poderia ser interpretada como se fosse uma continuidade dos processos ilustrados no 2° PSP ("*Sistema Frontal*"). Nas sequências de PNMM **(b)**, verifica-se o estabelecimento de um anticiclone em torno de 42°S/35°O em todos os dias da sequência. No dia 0 o deslocamento para leste deste sistema parece permitir a ampliação área de baixa pressão continental e a formação de um cavado sobre a SEB. A estacionariedade do anticiclone sugere que o PSP esteja associado a situações de bloqueio, provocadas pela sobreposição de um anticiclone de bloqueio à circulação do ASAS, o que provocaria a definição do núcleo deste sistema ao sul de sua posição climatológica. Esta configuração tem associação com eventos de ZCAS, conforme identificado no estudo de Escobar e Carvalho (2005) e Seluchi e Chou (2009).

O 4º PSP de ECI é denominado "*Sistema Frontal II"* e baseia-se na 4ª CPR - figura 4.28 **(a)** - que explica 7,58 % da variância total. É possível identificar nos campos de PNMM **(b)** a formação e o deslocamento de uma frente fria entre os dias -2 e 0, quando atinge a SEB. De forma geral, o padrão possui bastante semelhança ao 2° PSP (*"Sistema Frontal"*), com a diferença que o Sistema Frontal avança mais sobre a região do que em relação ao 2° PSP. As semelhanças entre os dois PSP também podem ser observadas pelo deslocamento da Frente e a configuração dos Anticiclones Subtropicais e Migratórios. No entanto, pequenas diferenças na distribuição e intensidade dos campos de PNMM pode ter sido o suficiente para que a variância fosse redistribuída em uma nova componente. Cita-se, por exemplo, o sistema frontal sobre o Oceano Pacífico Sul (45°S/90°O) entre os dias -1 e 0 e o centro de baixa pressão do Ciclone Extratropical em 52°S/32°O, os quais não puderam ser identificados no 2° PSP. De forma geral, o processo sinótico do 4° PSP pode ser considerado o mesmo do 2° PSP.

O 5º PSP de ECI é denominado "*Sistema Frontal III"* e baseia-se na 5ª CPR - figura 4.29 **(a)** - que explica 6,69 % da variância total. Nota-se nos campos de PNMM **(b)** a

representação de um processo sinótico semelhante aos 2° e 4° PSP, com o deslocamento de uma área de baixa pressão associada a um ciclone extratropical para sudeste entre os dias -3 e 0, em torno do paralelo 48°S. A frente fria deste sistema é fortalecido sobre o continente pelo pulso anticiclônico do ASPS no dia -2, que desloca o sistema até a SEB no dia -1 e prosseguindo o deslocamento no dia 0, quando ocorre o evento de CI.

Figura 4.25 - 1º Padrão de Sequência Principal (PSP) [adimensional] (a). Sequência de campos compostos de PNMM (contorno) [hPa] e espessura 500/1000 (contorno e sombreado) [dmgp] dos episódios altamente correlacionados (b). Gráfico dos Factor Loadings para cada ECI (c). A linha vermelha destaca os casos de correlação maior ou igual a 0,7.

Figura 4.26 - Similar à figura 4.25, para o 2º PSP.

Figura 4.27 - Similar à figura 4.25 para o 3º PSP.

Figura 4.28 - Similar à figura 4.25, para o 4º PSP.

Figura 4.29 - Similar à figura 4.25, para o 5° PSP.

4.3.2 Padrões de Sequências Principais de ECP

O 1º PSP de ECP denominado "*ASPS Intenso/Sistema Sinótico Oceânico*" é baseado na 1º CPR apresentado na figura 4.30 **(a)**, que explica 20,33 % da variância total dos campos e representa a configuração sinótica mais frequente associado a persistência de chuva na SEB. A partir da análise dos campos de PNMM **(b)**, percebe-se a similaridade entre este padrão e o 1° PSP dos ECI. A diferença consiste na intensificação do ASPS (40°S/90°O) adjacente ao sul do Chile durante os dias de chuva (dias 0, 1, 2 e 3). Sobre o Atlântico Sul predominam áreas de baixa pressão, associados a sistemas frontais ou cavados. A sequência de campos sugere a formação intermitente de anticiclones migratórios sobre a Argentina entre os dias 0 e 3, associados a sistemas frontais em sua vanguarda. No entanto, tais sistemas parecem deslocar-se pouco sobre o continente, sendo desviados para sudeste no Atlântico ou atuando de forma estacionária entre o continente e o oceano, contribuindo para a formação de um cavado sobre a SEB durante os dias de chuva (dias 0, 1, 2, 3). O campo do dia 3 assemelha-se a um dos padrões associados à ZCAS identificados por Escobar e Carvalho (2005). Escobar (2014) associa tal configuração a uma frente fria ao sul da SEB que em determinadas ocasiões atua de forma estacionária, contribuindo para a manutenção do alinhamento da convergência de umidade que origina episódio de ZCAS.

O 2º PSP de ECP é denominado *"Cavado SEB"* e representa o 2º padrão de processos sinóticos mais frequentes associados aos ECP, baseado na 2º CPR - figura 4.31 **(a) -** que explica 16,13% da variância dos campos. Na sequência dos campos de PNMM **(b)** é possível observar, nos dias antecedentes à chuva (dias -3 -2 e -1), o ASAS com núcleo alongado de 1019 hPa. No decorrer da sequência, este núcleo se posiciona mais ao sul no dia 0 e intensifica-se. De forma simultânea, nota-se a ampliação da área de baixa pressão continental a partir do dia 3 e o deslocamento do ASAS para leste. Destaca-se a formação de um cavado na borda noroeste do anticiclone, que se estende desde 30°S/22°O no Atlântico até a SEB. A presença do ASAS a sudeste do continente aparentemente favorece o desvio dos sistemas transientes ao sul de 45°S. Ademais, os processos nos demais níveis devem favorecer a permanência e ampliação do cavado sobre a SEB durante os dias de chuva (dias 0 a 3).

O 3º PSP de ECP é denominado *"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"* e baseia-se na 3ª CPR, apresentada na figura 4.32 **(a)**, que explica 14,76% da variância total. As sequências de PNMM **(b)** mostram o deslocamento de sistemas frontais adjacentes ao sul e sudeste da AS que parecem não alcançar a SEB, afastando-se do continente para sudeste no Atlântico. No entanto, os processos sinóticos envolvidos favorecem a formação de um cavado sobre a região e o oceano. No dia 3 o sistema aprofunda-se e origina um núcleo de baixa pressão adjacente à SEB (25°S/45°O). Na retaguarda do sistema frontal e do cavado, verifica-se um anticiclone migratório que aparenta adquirir características subtropicais ao fundir-se com o ASAS entre os dias 0 e 1. Em razão desta fusão, o núcleo do anticiclone se reforça em 40°S/50°W, que sugere a definição de uma situação de bloqueio acoplada ao ASAS, que contribui para manter o padrão de baixa pressão sobre o Atlântico adjacente à SEB. A configuração entre os posicionamentos da alta e baixa pressão assemelha-se ao identificado por Escobar (2014), que a associa com uma situação de bloqueio. As referidas áreas de baixa pressão ou até mesmo os cavados, representados nos compostos, podem ser interpretados como casos de ciclogêneses que são comuns nestas regiões nos meses de estudo, conforme verificado por Gan (1991) e Guia (2010).

O 4º PSP de ECP é denominado "*ASAS/Bloqueio /Cavado SEB II"* e baseia-se na 4ª CPR - figura 4.33 **(a)** - que explica 7,05 % da variância total. A sequência dos campos de PNMM **(b)** está associada ao deslocamento de sistemas frontais adjacentes ao sul e sudeste da AS e a intensificação do núcleo do ASAS ao sul da posição climatológica, de forma que este PSP apresenta bastante similaridade com o 3° PSP-ECP, descrito anteriormente. Neste 4° PSP os sistemas frontais aparentam alcançar o extremo sul da SEB no dia 0, quando enfraquecem próximo ao continente remanescendo apenas um cavado. Na retaguarda do sistema frontal, verifica-se o anticiclone migratório que adquire características subtropicais ao fundir-se com o ASAS. Em razão desta fusão, o núcleo deste sistema se reforça e se posiciona ao sul de sua posição climatológica, sugerindo o acoplamento de um anticiclone de bloqueio com a circulação do ASAS. Simultaneamente, o cavado remanescente do sistema frontal aprofunda-se durante os dias de chuva, entre os dias 0 e 3.

O 5º PSP de ECP é denominado "*Ciclones Adjacentes à AS"* e baseia-se na 5ª CPR - figura 4.34 **(a)** - que explica 4,99 % da variância total. Destaca-se na sequência de campos

de PNMM **(b)** a ampla área de baixa pressão sobre o continente, associada a presença da Baixa do Chaco, que se mescla com outra sobre o Atlântico adjacente ao sul e sudeste da AS. Nos dias 0, 1 e 2, o núcleo de baixa pressão definido em 45°S/60°O e o cavado orientado noroeste/sudeste sobre a SEB e Atlântico, sugere a ocorrência de processos ciclogenéticos sobre estas áreas. Percebe-se que o ciclone ao leste da Argentina tem suporte para sua formação, mas se desloca pouco e dissipa poucos dias depois em um local próximo de sua origem. Assim, as chuvas na SEB seriam resultado da persistência de características nos demais níveis que favoreceriam tanto o desenvolvimento de chuva quanto os ciclones, sobretudo no Atlântico adjacente à região.

Figura 4.30 - 1° Padrão de Sequência Principal (PSP) [adimensional] (a). Sequência de campos compostos de PNMM (contorno) [hPa] e espessura 500/1000 (contorno e sombreado) [dmgp] dos episódios altamente correlacionados (b). Gráfico dos Factor Loadings para cada ECP (c). A linha vermelha destaca os casos de correlação maior ou igual a 0,7.

Figura 4.31 - Similar à figura 4.30, para o 2° PSP.

Figura 4.32 - Similar à figura 4.30, para o 3° PSP.

Figura 4.33 - Similar à figura 4.30, para o 4° PSP.

Figura 4.34 - Similar à figura 4.30, para o 5° PSP.

4.3.3 Ambiente Sinótico dos Padrões de Sequências Principais

Esta subseção apresenta as características troposféricas associadas aos PSP dos ECI e ECP. A reconstrução do ambiente sinótico foi feita a partir de compostos de variáveis, dos conjuntos de episódios altamente correlacionados com cada padrão. A escolha dos níveis e dos campos de variáveis considerou a importância destes no contexto do diagnóstico e prognóstico dos eventos de chuvas. Os campos mostrados retratam apenas o dia 0 dos ECI e o dia 3 dos ECP, que são os dias que definem os respectivos tipos de chuva. No entanto, as descrições consideram também os campos dos demais dias das sequências analisadas, os quais estão disponíveis nos Apêndices C e D deste trabalho.

4.3.3.1 Ambientes Sinóticos dos ECI

1° PSP de ECI: *"Sistema Sinótico Oceânico"*

De acordo com a análise do 1° PSP, a sequência sugere a atuação indireta de um sistema sinótico oceânico na ocorrência de CI. Na figura 4.35, percebe-se no campo de PNMM **(b)** um sistema frontal sobre o Atlântico (40°S/40°O) e um cavado desde a baixa pressão no centro da AS (20°S/65°O), SEB e Atlântico (22°S/50°O). Em 925 hPa **(c)** nota-se a predominância de ventos de leste/nordeste sobre a SEB e de noroeste sobre o Atlântico. No entanto, percebe-se que em 850 hPa **(d)** este escoamento de noroeste se define também sobre a SEB até a região Amazônica. Neste nível também se nota valores de convergência de umidade específica em todos os dias da sequência, mas que se intensificam entre os dias -1 e 0. Em 500 hPa **(e)** observa-se a partir da curvatura das isoípsas, um cavado entre os dias -1 e 0 com eixo entre o Atlântico, SUL e sul da SEB. Em 200 hPa **(f)** as linhas de corrente permitem identificar uma circulação em altitude típica de verão, com a presença da Alta da Bolívia ao centro do continente e o Vórtice do Nordeste situado em aproximadamente 10°S/25°O. Nota-se o alinhamento dos valores positivos de divergência desde o norte da AS, SEB e Atlântico, principalmente entre os dias -1 e 0. Os Jatos de altos níveis localizam-se imediatamente ao sul da circulação anticiclônica, em aproximadamente 40°S/40°O no dia 0. Os núcleos máximos de vento, que evidenciam uma região com características predominantemente baroclínicas, são associados aos Jatos Polar (JP) e Subtropical (JST) e contornam um cavado nesta área. No dia 0 é observada a ampliação da área de atuação dos jatos que indicam o fortalecimento das características baroclínicas do sistema frontal presente em superfície sobre o Atlântico Sul. A

contribuição deste padrão sinótico na produção de CI na SEB pode ser atribuída pela intensificação da instabilidade termodinâmica em razão do deslocamento de sistemas frontais sobre o Atlântico, que alteram o padrão de escoamento em baixos níveis para noroeste sobre a SEB, promovendo o transporte ar quente e úmido de latitudes baixas que aumentarão a instabilidade neste setor. Adicionalmente, a amplificação do cavado em 200 hPa sobre o SUL intensifica as áreas de difluência da borda sudeste da Alta da Bolívia, evidenciado pelos sinais de divergência positiva em altitude, que induz a convergência de massa úmida em baixos níveis, intensifica o movimento vertical e, consequentemente, a convecção que produzirá a chuva na SEB.

Figura 4.35 - Dia zero (D 0) do 1° PSP dos ECI (a) e respectivas composições dos casos altamente correlacionados: PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (b); umidade específica [10-3 g.g-1] (sombreado) e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 925 hPa (c); convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (d); altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (e); vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul) (f).

2° PSP de ECI: *"Sistema Frontal"*

O 2° PSP ilustra o deslocamento de um sistema frontal, provavelmente uma frente fria, desde Argentina e SUL, que alcança a SEB no dia 0. O campo de PNMM da figura 4.36 **(b)** destaca uma frente fria no dia 0 sobre SP e Atlântico e o anticiclone migratório em sua retaguarda, com núcleo de 1022 hPa em 40°S/45°O. Em 925 hPa **(c)** percebe-se um intenso escoamento de sudeste/leste sobre o SUL e SEB, proporcionado pelo padrão do anticiclone pós-frontal ao sul. Esta direção também é observada em 850 hPa **(d)**, além de valores significativos de convergência de umidade específica, principalmente nos dias -1 e 0. No nível de 500 hPa a sequência mostra a amplificação de um cavado entre o Atlântico Sul e a SEB e o deslocamento de uma crista sobre o sul da AS, como pode ser visto no dia 0 **(e)**. No campo de 200 hPa **(f)** as linhas de corrente evidenciam um padrão de escoamento de verão similar ao 1º PSP, bem como o alinhamento das áreas de divergência positiva. Entretanto, os núcleos de ventos máximos são menos abrangentes e situam-se na dianteira de um cavado sobre o Atlântico Sul (30°S/40°O) que oferece suporte para o sistema sobre o oceano e a SEB. A influência deste padrão sinótico na produção de CI na SEB é atribuída a atuação de um sistema frontal, neste caso uma frente fria que se forma sobre a Argentina e desloca-se sobre o SUL, leste da SEB e Atlântico. O significativo de escoamento de sudeste em baixos níveis (850 hPa) é proporcionado pelo anticiclone migratório e sugere intenso transporte de umidade do oceano para a região. A advecção de vorticidade ciclônica em altitude (200 hPa) e níveis médios (500 hPa) favorece a amplificação do cavado frontal, que interage em 200 hPa com a borda da Alta da Bolívia de modo semelhante ao 1° PSP pois intensifica a divergência sobre a SEB e o levantamento da massa úmida em baixos níveis, resultando na formação das chuvas.

Figura 4.36 - Similar à figura 4.35, para o 2° PSP dos ECI.

3° PSP de ECI: *"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"*

A sequência dos campos do 3º PSP mostram o posicionamento do ASAS ao sul de sua posição climatológica, sugerindo características de bloqueio. Os campos do dia 0 (figura 4.37) o ASAS desloca-se discretamente para leste, de forma que amplia a área de baixa pressão sobre a AS, posicionando um cavado sobre a SEB **(b)**. A análise dos dias anteriores mostra a mudança do padrão de vento em 925 hPa **(c)** e 850 hPa **(d)**, de leste/sudeste, para nordeste/norte/noroeste, em função do deslocamento do ASAS. Notam-se valores de convergência de umidade específica sobre a SEB em todos os dias da sequência, mas que se intensificam no dia 0, estendendo-se desde o SUL ao NEB. O padrão de altura geopotencial em 500 hPa **(e)** é definido pelo cavado em 25°S/55°O e a crista sobre o Atlântico Sul em 40°S/40°O. A crista também pode ser visualizada em 250 hPa **(f)** em todos os dias da sequência. Tais características evidenciam um sistema com estrutura barotrópica e corroboram a hipótese de uma configuração de bloqueio sobreposta ao ASAS nestas áreas. Ainda em 250 hPa, percebe-se o fluxo anticiclônico da Alta da Bolívia definido ao norte em relação aos demais PSP. A sequência de altitude

mostra ainda, que no dia 0 amplifica-se um cavado sobre o SUL que contribui para o levantamento da massa de ar, evidenciado pelo aumento dos valores de divergência positiva sobre estas regiões. Durante os dias anteriores à CI o intenso escoamento de leste/nordeste em baixos níveis (850 hPa e 925 hPa) deve favorecer o transporte de umidade do oceano para a SEB. Uma vez que se define um ambiente úmido sobre a região, alia-se o escoamento de noroeste em 850 hPa que advecta mais umidade e uma massa relativamente mais aquecida no dia 0. Tais características produzem um ambiente favorável ao desenvolvimento de nuvens por instabilidade termodinâmica. Adicionalmente, a advecção de vorticidade ciclônica em altos níveis amplifica o cavado, que diflui o escoamento em altitude e gera regiões de divergência que impulsionam o movimento vertical ascendente da massa úmida em baixos níveis, potencializando o amplo desenvolvimento de nuvens convectivas que conduzirão às chuvas.

Figura 4.37 - Similar à figura 4.35, para o 3° PSP dos ECI.

4° PSP de ECI: *"Sistema Frontal II"*

Os processos representados na sequência de campos do 4º PSP, envolvem o fortalecimento de uma frente fria sobre o Atlântico Sul (40°S/30°O) que alcança a SEB no dia 0. No campo de PNMM da figura 4.38 **(b),** percebe-se o posicionamento do anticiclone migratório pós-frontal na retaguarda da Frente, com núcleo de 1021 hPa em 35°S/55°O, que determina um padrão de circulação anticiclônico sobre as regiões de influência que incluem o SUL e a porção inferior da SEB, com ventos predominantes de leste e sudeste em 925 hPa **(c)** e 850 hPa **(d)**. A sequência de campos de 850 hPa mostra o fortalecimento da convergência de umidade específica no dia 0, simultâneo ao fortalecimento do escoamento de nordeste/noroeste na porção norte da região. Em 500 hPa **(e)** as isoípsas evidenciam uma crista sobre o Chile e Argentina (35°S/70°O) e um cavado frontal entre o SUL e o Atlântico (35°S/50°O), visível também em 200 hPa **(f).** Destaca-se em altitude os Jatos na dianteira do cavado e a circulação anticiclônica na metade norte da AS, que favorece a formação de áreas de divergência positiva de massa, principalmente sobre a SEB, alinhadas desde o norte do continente ao Atlântico Sul.

Figura 4.38 - Similar à figura 4.35, para o 4° PSP dos ECI.

5° PSP de ECI*: "Sistema Frontal III"*

A sequência do 5° padrão ilustra o fortalecimento do ramo frio de um Ciclone nos dias anteriores à chuva. O ramo frio deste sistema (frente fria) alcança a SEB no dia -1 e 0, quando ocorre a CI. No campo de PNMM **(b)** da figura 4.37, nota-se o anticiclone migratório sobre o Atlântico adjacente ao SUL, com pressão de núcleo de 1019 hPa, centrado em 35°S/40°O. Assim como o PSP anterior, o anticiclone influencia na circulação atmosférica em 925 hPa **(c)** e 850 hPa **(d)**, pelo escoamento de sudeste no SUL e porção inferior da SEB. Ao norte da região o fluxo de norte/noroeste predomina, como resultado da convergência dos ventos da frente fria, característica que pode ser visualizada também pela convergência de umidade específica no dia 0. Em 500 hPa **(e)** a sequência que indica a amplificação de um cavado, atinge a maior amplitude no dia 0, estendendo-se sobre a SEB e Atlântico adjacente. Em 200 hPa **(f)** a circulação anticiclônica predomina na porção norte da AS e favorece a divergência de massa positiva em grande parte destas áreas. Os núcleos de vento máximo indicam a presença dos Jatos associados aos Sistemas Frontais em superfície no Pacífico e no Atlântico, que evidenciam regiões predominantemente baroclínicas ao sul de 30°S.

Figura 4.39 - Similar à figura 4.35, para o 5° PSP dos ECI.

4.3.3.2 Ambientes Sinóticos dos ECP

1º PSP - ECP: *"ASPS Intenso/Sistema Sinótico Oceânico"*

Os processos envolvidos no 1° PSP mostram o fortalecimento do ASPS a sudoeste da AS e propagação sequencial de sistemas frontais no Atlântico Sul, que alinham a um cavado sobre a SEB. Na figura 4.40, a análise do campo de PNMM e Espessura **(b)** mostra o ASPS ao sul de sua posição climatológica e com núcleo de 1022 hPa em 40°S/85°O. Percebe-se um anticiclone migratório ao leste da Argentina com uma provável frente fria em sua vanguarda, que se estende sobre o Atlântico Sul e alinha-se a um cavado sobre a SEB. Os campos de 925 hPa **(c)** e 850 hPa **(d)** mostram que deslocamento destes sistemas sobre o oceano altera a circulação de nordeste para noroeste sobre a SEB, que persiste desde o dia 0 ao dia 3. Em 500 hPa a sequência dos campos de altura geopotencial ilustra a amplificação de uma crista sobre o Pacífico (45°S/90°O) e um cavado Atlântico Sul durante os dias de chuva na SEB, claramente definidos no dia 3 **(e)**. Percebe-se a circulação anticiclônica da Alta da Bolívia em 200 hPa **(f)** e uma crista deste sistema sobre a SEB que favorecem à divergência de massa neste nível. Os Jatos contornam ao sul do escoamento anticiclônico (25°S) sobre o Atlântico Sul, acompanhando a curvatura ciclônica do cavado frontal. No Pacífico as linhas de corrente indicam o desvio dos jatos para altas latitudes (acima de 50°S), o que reforça a hipótese de uma breve situação de bloqueio, apesar deste fenômeno ter maior frequência durante o inverno austral ao sul destas áreas sobre o Pacífico, conforme Trenberth (1985) e Marques (1996). Neste padrão, a ocorrência de chuva sobre a SEB é resultado de um processo semelhante ao descrito no 1° PSP dos ECI. Sugere-se que ocorre o aumento da instabilidade termodinâmica sobre a região em razão do deslocamento de sistemas frontais sobre o Atlântico, que alteram o padrão de escoamento em baixos níveis para noroeste sobre a SEB, promovendo o transporte ar quente e úmido de latitudes baixas que aumentam a instabilidade neste setor. A presença do cavado frontal sobre o oceano favorece o direcionamento dos ventos em baixos níveis (850 hpa e 925 hPa) e o levantamento da massa atmosférica úmida e instável em baixos níveis. A dinâmica difluente da crista sudeste da Alta da Bolívia em 200 hPa favorece a divergência de massa que contribui para intensificar o movimento vertical, embora de forma menos intensa em relação ao 1° PSP dos ECI, mas o suficiente para potencializar a convecção e a ocorrência de chuva. O ponto chave deste PSP que proporciona a persistência das chuvas na SEB pode ser

justificada pelo deslocamento lento de uma onda sinótica, que fortalece o ASPS com uma crista em 500 hPa a partir do dia -1 e que persiste nos demais dias, fortalecendo a alta pressão em superfície que bloqueia ou desvia demais distúrbios de oeste que poderiam modificar o a circulação no sudeste da AS. Assim, a formação sucessiva de sistemas frontais de fraca intensidade, contribuiria para a manutenção de um padrão de escoamento entre a SEB e o Atlântico favorável à produção de chuvas na SEB.

Figura 4.40 - Terceiro dia (D 3) do 1° PSP dos ECP (a) e respectivas composições dos casos altamente correlacionados: PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (b); umidade específica [10-3 g.g-1] (sombreado) e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 925 hPa (c); convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (d); altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (e); vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul) (f).

2º PSP - ECP: *"Cavado SEB"*

A sequência de campos do 2° PSP mostra o núcleo do ASAS fortalecido até o dia 3, quando se desloca para leste e permite a ampliação da área de baixa pressão na porção central sobre o continente e no Atlântico adjacente. A figura 4.41 apresenta os campos de PNMM do dia 3 **(b)**, onde se verificam cavados entre o extremo sul do Brasil e ao sul de SP entre os dias 0 e 3. O ASAS apresenta-se de forma alongada e com núcleo de 1022 hPa posicionado em 40°S/30°W. Nos dias 2 e 3 ocorre a ampliação da baixa pressão continental e o afastamento do anticiclone subtropical para leste. A amplificação de um cavado em 500 hPa **(e)** favorece a diminuição do campo de PNMM ao centro da AS. Nota-se que o discreto gradiente de altura geopotencial associado ao cavado evidencia um ambiente pouco baroclínico, sugerindo a formação de sistemas frontais fracos ou não frontais nestas áreas. O cavado ainda favorece a mudança da circulação em baixos níveis sobre a SEB, de nordeste para noroeste, ilustrado nos campos de 925 hPa **(c)** e 850 hPa **(d)**. No campo de 850 hPa verificam-se valores de convergência de umidade específica sobre a SEB em todos os dias da sequência. A circulação anticiclônica predomina sobre a metade norte da AS no nível de 200 hPa **(f)**, cuja difluência favorece áreas de divergência de massa positiva neste nível entre o norte do continente e o Atlântico. Os núcleos de ventos máximos que caracterizam os Jatos, situam-se sul de 45°S, indicando que as zonas mais baroclínicas situam-se distantes da SEB, restritas a latitudes médias e altas. Dentre as características observadas, a produção de chuva neste padrão está associada à amplificação gradual de um cavado com fraco gradiente de altura geopotencial em 500 hPa, de modo a oferecer suporte para o levantamento da massa atmosférica úmida. Ressalta-se que estas características podem estar associadas ao desenvolvimento de sistemas frontais ou não frontais sobre o oceano adjacente ao SUL e a SEB, com destaque para ciclogêneses que se desenvolvem preferencialmente neste setor durante esta época do ano. O processo corresponde à ampliação da área de baixa pressão em superfície e pelos valores de convergência de umidade específica em 850 hPa e divergência em altitude (200 hPa). Nos baixos níveis da SEB, a mudança do escoamento de leste/nordeste para noroeste contribui para um ambiente favorável a ocorrência de chuva, pelo transporte de ar quente e úmido de baixas latitudes para a região.

Figura 4.41 - Similar à figura 4.40, para o 2° PSP dos ECP.

3º PSP - ECP: *"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"*

A sequência de PNMM do 3° PSP ilustra o que parece ser a intensificação do ASAS em 40°S após a fusão com um anticiclone migratório desprendido do ASPS entre os dias 0 e 1. O posicionamento e o fortalecimento deste núcleo ao sul sugerem uma situação de tipo bloqueio, descrita por Escobar e Carvalho (2005) e Seluchi e Chou (2009). O núcleo parece atingir sua máxima intensidade no dia 3, figura 4.42 **(b)**, quando origina uma área de baixa pressão ao norte deste sistema, sobre o oceano adjacente à SEB, e de onde se estende um cavado a sudeste embebido no ASAS. Na circulação em 925 **(c)** e 850 hPa **(d)**, em todos os dias da sequência, percebe-se um ambiente marcado pela convergência de umidade específica, que se intensifica durante os dias de chuva (dias 0 a 3). Os campos também mostram o predomínio de ventos de nordeste ao norte da SEB e de sudeste na porção sul. O padrão de escoamento em baixos níveis sobre a região parece ser modulado pela borda noroeste da ASAS e pela amplificação de um cavado sobre o Atlântico Sul, claramente definido no campo de altura geopotencial em 500 hPa **(e),** que também contribui para a formação da área de baixa pressão em superfície no dia 3 **(b)**. Ao sul deste cavado, em níveis médios, verifica-se o posicionamento de uma crista. A

configuração descrita também pode ser visualizada em 200 hPa **(f)**. A divergência de massa em altitude sobre a SEB durante os dias de chuva parece intensificar-se pelo mecanismo de levantamento do cavado sobre o Atlântico, que em conjunto com a borda sudeste do escoamento anticiclônico (Alta da Bolívia) geram forte difluência em altos níveis e revelam áreas com intenso movimento vertical, que potencializam o desenvolvimento convectivo. O posicionamento dos jatos neste nível aponta que as zonas mais baroclínicas situam-se ao sul de 40°S no Pacífico e 30°S/25°O no Atlântico. As características deste PSP indicam que a produção das chuvas na SEB pode estar associada a processos ciclogenéticos, de forma semelhante ao 2° PSP-ECP. Neste caso, a amplificação de um cavado com maior gradiente de altura geopotencial favorece o levantamento do ar, que resulta no aprofundamento do cavado em superfície que se define como um núcleo de baixa pressão no dia 3 dos compostos. A baixa pressão pode ser interpretada como uma suavização média de casos de ciclogêneses neste setor, que são eventos caracterizados pela forte convergência de umidade específica em baixos níveis, conforme observado no campo de 850 hPa. A crista em 500 hPa intensifica a pressão de núcleo do ASAS ao sul da posição climatológica, que atua como um bloqueio e mantém os processos mencionados adjacente a SEB, favorecendo a ocorrência de chuva significativa durante os 4 dias sobre a região.

Figura 4.42 - Similar à figura 4.40, para o 3° PSP dos ECP.

4º PSP - ECP: *"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB II"*

O processo representado no 4° PSP mostra que o deslocamento de sistemas frontais adjacente ao SUL e o Atlântico favorecem a formação de um cavado adjacente a SEB, que persiste pela intensificação do ASAS ao sul. Na figura 4.43 do dia 3, nota-se pelo campo de PNMM **(b)** a área de baixa pressão adjacente a SUL e a SEB, e o ASAS com núcleo ao sul de sua posição climatológica em 40°S/30°O, sugerindo uma breve situação de bloqueio. A convergência de umidade especifica em 850 hPa **(d)** é evidente em todos os dias da sequência, entretanto, durante os dias 0 e 3 verifica-se a intensificação dos ventos de nordeste e sudeste neste nível e também em 925 hPa **(c).** A configuração das isoípsas no campo de 500 hPa **(e)** mostram a amplificação de um cavado sobre o SUL e a SEB simultâneo ao deslocamento de uma crista ao sul (40°S/30°O), que dá suporte para a intensificação do núcleo do ASAS. Em 200 hPa **(f)** nota-se a circulação anticiclônica em grande parte do continente. Um cavado na borda sudeste deste sistema intensifica a difluência, verificada pela distribuição dos valores positivos de divergência neste nível. Percebe-se o enfraquecimento e a bifurcação no escoamento de oeste em altitude sobre a

região da crista em níveis médios desvia dos distúrbios sinóticos mais baroclínicos para sul de 50°S. Adicionalmente, tal característica sugere que a advecção de vorticidade ciclônica sobre o SUL e a SEB amplifica o cavado sobre estas regiões que mantém o suporte para o levantamento de massa atmosférica, potencializando a formação de instabilidades.

Figura 4.43 - Similar à figura 4.40, para o 4° PSP dos ECP.

5º PSP - ECP: *"Ciclones Adjacentes à AS"*

O 5° PSP ilustra o padrão de sequências menos frequente, característico pela formação de áreas de baixa pressão, possivelmente associadas à processos ciclogenéticos, ao longo do Atlântico adjacente ao sudeste da AS. Na análise da figura 4.44, no campo de PNMM, o ASPS situa-se em 35°S/95°O e atua de forma ampla sobre o Pacífico Sul. Percebe-se que o ciclone extratropical, formado nos dias 0 e 2 sobre o leste da Argentina, não evolui para sudeste e dissipa-se no dia 3 **(b)**. Em 925 hPa **(c)** não há uma direção preferencial de escoamento, porém, em 850 hPa **(d)** observa-se claramente a direção noroeste em toda a SEB, além de valores de convergência de umidade específica significativos. Em 500 hPa **(e)** nota-se a amplificação e persistência de um cavado com significativo gradiente de

altura geopotencial desde 45°S/60°O no Atlântico, até o norte da Argentina, em 25°S/60°O. Uma crista pode ser vista sobre o Pacífico, em 40°S/90°O, que reforça o anticiclone subtropical em superfície. Na sequência dos campos de 200 hPa **(f)** nota-se a bifurcação do escoamento sobre o Pacífico Sul (30°S/100°O), que sugere uma breve situação de bloqueio do escoamento de oeste, de modo que mantém as configurações sinóticas descritas sobre o sudeste da AS. Destaca-se ainda em altitude, a circulação anticiclônica que se estabelece sobre a porção centro-leste do Brasil e que provoca ampla divergência na SEB. Os Jatos contornam o sudoeste e sul do anticiclone, na dianteira do cavado sobre a Argentina e Atlântico, indicando áreas fortemente baroclínicas. A divergência em altitude gerada pela Alta da Bolívia, que se desloca para leste e inclina-se sobre a SEB, parece ser o mecanismo principal que intensifica a formação de instabilidades que conduz a produção de chuva na região.

Figura 4.44 - Similar à figura 4.40, para o 5° PSP dos ECP.

4.3.4 Resumo: PSP e Ambientes Sinóticos

A partir da aplicação da ACP aos campos sequenciais de PNMM, foram obtidos 5 PSP para cada tipo de episódio de chuva. As características troposféricas para cada PSP foram analisadas através dos campos compostos dos casos altamente correlacionados com cada padrão. Os PSP foram nomeados para facilitar a comparação entre eles, utilizando-se como nomenclatura o sistema ou a característica sinótica que contribuiu para a ocorrência de chuva na SEB. As porcentagens de variância explicada em cada PSP são resumidas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resumo das variâncias explicadas para cada PSP obtido.

ECI			ECP		
Ordem	Variância	Nome do Padrão	Ordem	Variância	Nome do Padrão
1° PSP	21,74%	"Sistema Sinótico Oceânico"	1° PSP	20,33%	"ASPS Intenso/Sist. Sinótico Oceânico"
2° PSP	18,99%	"Sistema Frontal"	2° PSP	16,13%	"Cavado SEB"
3º PSP	18,05%	"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"	3º PSP	14,76%	"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"
4º PSP	7,58%	"Sistema Frontal II"	4º PSP	7,05%	"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB II"
5° PSP	6,69%	"Sistema Frontal III"	5° PSP	4,99%	"Ciclones Adjacentes à AS"

O 1° PSP-ECI (*Sistema Sinótico Oceânico*) ilustra a formação ou o desenvolvimento de sistemas frontais ou não frontais sobre o oceano, que organizam um escoamento em baixos níveis que favorecem um ambiente termodinamicamente instável sobre a SEB. O 1º PSP-ECP (*ASPS Intenso/Sistema Sinótico Oceânico*) apresenta bastante similaridade com o 1° PSP-ECI. A diferença consiste pela intensificação do ASPS ao longo da sequência de dias do ECP, provocada pelo deslocamento de uma onda sinótica de grande extensão longitudinal. O 2º PSP-ECI (*Sistema Frontal*) mostra o deslocamento de um típico sistema frontal desde a Argentina até a SEB, cujo padrão de circulação de sudeste em baixos níveis, aliado ao mecanismo de levantamento de massa do cavado frontal, favorecem a convergência de umidade e precipitação na Região. Os 4º (*Sistema Frontal II*) e 5º PSP-ECI (*Sistema Frontal III*) mostram processos sinóticos semelhantes ao 2º PSP-ECI. Sugere-se que o posicionamento ou intensidade específica dos sistemas no domínio analisado possam ter contribuído para que as variâncias dos campos tenham sido redistribuídas em novas componentes. O 3º PSP-ECI (*ASAS/Bloqueio/Cavado SEB*) também mostra uma configuração semelhante ao 3° PSP-ECP (*ASAS/Bloqueio/Cavado/SEB*). Nestes padrões verificam-se a ampliação de uma área de

baixa pressão continental e o estabelecimento de um núcleo anticiclônico em torno de 40ºS/45°O. O posicionamento e estacionariedade do anticiclone sugere a formação de um anticiclone de tipo bloqueio, mas com características mescladas com o ASAS. O estabelecimento deste sistema contribui com a permanência e ampliação da área de baixa pressão sobre o sudeste da AS, inclusive sobre a SEB e Atlântico adjacente. Para os ECP, essa área de baixa pressão é melhor demarcada em comparação aos campos de ECI, o que sugere que a formação de sistemas frontais fracos ou não frontais estejam mais relacionados com a persistência de chuva ou mesmo a eventos coincidentes de chuva intensa em episódios persistentes (CI em ECP). O 4º PSP-ECP (*ASAS/Bloqueio/Cavado SEB II*) também ilustra um processo semelhante ao 3° PSP-ECP, com diferenças que consistem na intensidade e deslocamento dos sistemas, influenciados pela propagação de uma onda sinótica mais rápida em comparação ao padrão anterior. O 5º PSP-ECP (*Ciclones Adjacentes à AS*) mostra o predomínio de baixas pressões ao leste da Argentina e Atlântico, associadas ao desenvolvimento de sistemas frontais, como ciclones extratropicais, sobre o Atlântico adjacente ao SUL e à Argentina. A gênese destes sistemas contribui com escoamento de norte/noroeste em baixos níveis sobre a SEB, que aumentam a instabilidade termodinâmica pela advecção de temperatura e umidade, enquanto que a divergência em altitude favorece a convecção e a produção de chuvas na Região.

5 ESTUDOS DE CASOS

O presente capítulo apresenta o estudo de dois episódios de chuva. Optou-se por selecionar um ECI e ECP relativamente recentes, em função da disponibilidade de imagens de satélite e cartas sinóticas que proporcionam uma análise mais completa. As figuras exibidas neste capítulo são referentes apenas ao dia em que se configura um episódio, sendo o dia 0 para os ECI e o dia 3 para os ECP. As sequências completas de campos para cada episódio estão disponíveis no Apêndice D deste trabalho.

5.1 ECI - 13 de fevereiro de 2009

Os campos de PNMM do ECI de 13 de fevereiro de 2009 apresentam uma correlação de 0,6 com o 1º PSP *"Sistema Sinótico Oceânico"*. Na figura 5.1 verifica-se precipitação em volumes relativamente baixos em grande parte da SEB, nos dias que antecedem o dia 0, quando ocorre o evento de chuva intensa entre os estados de SP, MG e RJ

Figura 5.1 - Precipitação acumulada em 24h [mm] para o ECI de 13 de fevereiro de 2009 (D 0) e dos dias que o antecede (D -)

As imagens de satélite - figura 5.2 **(a)** – mostram o predomínio de nuvens sobre a SEB com de temperatura de topo abaixo de -50°C, que evidenciam o seu significativo desenvolvimento vertical. Percebe-se a nebulosidade de um sistema frontal sobre o Atlântico, identificado nas cartas sinóticas **(b)**, nos dias -1 e 0. O sistema atua sobre o oceano, mas intensifica a atividade convectiva sobre a SEB que provoca a chuva intensa no dia 0, simultaneamente ao estabelecimento da ZCAS. Este caso é um exemplo de chuva intensa em evento persistente (CI em ECP), cujo sistema causador foi classificado como **ZCAS+SSO** (episódio de ZCAS simultâneo à atuação de um sistema sinótico oceânico adjacente à SEB).

Figura 5.2 - Imagens de satélite do canal infravermelho realçado (a) e cartas sinóticas (b) referentes ao ECI de 13 de fevereiro de 2009.
Fonte: CPTEC/INPE (http://www.cptec.inpe.br).

Na figura 5.3 o campo de PNMM **(a)** evidencia o sistema frontal sobre o Atlântico adjacente à SEB, conforme apresentado nas cartas sinóticas. Percebe-se o alinhamento de noroeste/sudeste da circulação 850 hPa **(b)**. A intensidade da convergência de umidade neste nível mostra um ambiente favorável ao desenvolvimento de nebulosidade convectiva, conforme observado nas imagens de satélite. No nível de 500 hPa **(c)** percebe-se o cavado frontal sobre o Atlântico Sul, visível também em 200 hPa **(d)**. As linhas de corrente evidenciam a circulação anticiclônica da Alta da Bolívia, que predomina sobre a porção central da AS. A difluência do escoamento anticiclônico sobre a SEB é intensificada pela amplificação do cavado que gera divergência neste nível e induz a elevação da massa de ar úmida e instável de baixos níveis, potencializando assim o desenvolvimento convectivo sobre a SEB.

Figura 5.3 - Dia zero (D 0) em que configura o ECI (13-fev-2009): PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 hPa [dmgp] (sombreado) [hPa] (a); convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b); altura geopotencial para o nível de 500 hPa [dmgp] (c); vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul) (d).

O caso apresentado ilustra o início de um evento de ZCAS que se define após o deslocamento de um sistema frontal sobre o oceano. O ambiente sobre a SEB apresentava-se instável desde o dia -3, com ocorrência de precipitação na porção sudeste da SEB, de modo que também configurou um evento de persistência de chuva. Entretanto, o deslocamento de uma frente fria sobre o Atlântico entre os dias -1 e 0 contribuiu no aumento da convergência de umidade em baixos níveis e favoreceu a convecção que culminou no evento de chuva intensa.

5.2 ECP - 13 à 16 de janeiro de 2007

Os campos de PNMM deste ECP de 13 à 16 de janeiro de 2007 apresentam uma correlação de 0,8 com o 1º PSP *"ASPS Intenso/Sistema Sinótico Oceânico"*. Neste episódio verificou-se a ocorrência de chuva esparsa sobre a SEB nos dias que antecediam o início do evento persistente. Na figura 5.4 nota-se entre os dias 1 e 3 o formato alongado das isoietas, que delimitam a localização da persistência sobre a região, principalmente entre os estados de SP, MG e RJ.

Figura 5.4 - Precipitação acumulada em 24h [mm] para o ECP de 13 (D 0) à 16 (D 3) de janeiro de 2007 e dos dias que o antecede (D -).

Nas imagens de satélite no canal infravermelho da figura 5.5 **(a)**, percebe-se que a nebulosidade ao norte da SEB nos dias -3 e -2 está associado a um padrão de ZCAS, mantido por um sistema frontal que atua sobre o Atlântico, de acordo com a demarcação das cartas sinóticas **(b)**. No dia -1, com o deslocamento do sistema frontal para leste o mecanismo de levantamento do cavado frontal diminui sobre o continente, o que ocasiona o enfraquecimento da ZCAS. No entanto, o ambiente termodinamicamente instável ainda favorece às chuvas. O padrão de circulação é intensificado pela formação de um novo sistema frontal no oceano entre os dias 0 e 1, que não alcança a SEB mas reativa a atividade da ZCAS. A repetição deste mecanismo no dia 3 mantém o padrão de convergência da ZCAS, bem como as condições para chuva na SEB. Simultaneamente ao deslocamento dos sistemas frontais, percebe-se o ASPS com núcleo reforçado e adjacente ao sul do Chile entre os dias 0 e 3.

Figura 5.5 - Imagens de satélite do canal infravermelho realçado (a) e cartas sinóticas (b) referentes ao ECP de 13 a 16 de janeiro de 2009.
Fonte: CPTEC/INPE (http://www.cptec.inpe.br).

Na sequência de PNMM deste caso destaca-se o fortalecimento do ASPS e a presença de áreas de baixa pressão relativas a sistemas frontais sobre o Atlântico Sul. Percebe-se a presença de dois ciclones extratropicais. O primeiro evolui entre o dia 1, afastando-se do continente no dia 2, e o segundo forma-se no dia 3 - figura 5.6 **(a)**. Na retaguarda do ramo frio dos ciclones observa-se a formação de um anticiclone migratório, que atua de forma enfraquecida. O campo de 850 hPa **(b)** é caracterizado pela intensa convergência de

umidade específica e pelo escoamento de noroeste, desde a Amazônia, SEB até o Atlântico. No nível de 500 hPa **(c)** verifica-se um padrão de onda bem definido, pela presença de uma crista que reforça o ASPS (40°S/90°O) e o cavado frontal sobre o Atlântico Sul (40°S/40°O). Em 200 hPa, **(d)** nota-se ampla circulação anticiclônica centrada sobre o Paraguai e contornada em sua borda sul pelos Jatos. No decorrer dos dias, o escoamento anticiclônico posiciona-se a leste, conforme ocorre a amplificação do cavado, com uma crista sobre a SEB que proporciona valores significativos de divergência. Os jatos se intensificam nos dias 2 e 3 quando ocorre a formação de um novo sistema frontal sobre o Atlântico.

Figura 5.6 - Similar à figura 5.1.3, para o dia três (D 3) em que configura o ECP (16-jan-2007).

A propagação de uma onda sinótica com grande extensão longitudinal intensifica o ASPS e fornece suporte para o desenvolvimento de sistemas frontais no Atlântico, evidenciados pela crista e cavado em 500 hPa, respectivamente. A partir do dia -1 e nos demais dias verifica-se uma estacionariedade aparente da onda, que mantém o padrão de circulação

associado sobre o Pacífico adjacente ao Chile e Atlântico Sul. No Atlântico, a advecção de vorticidade ciclônica do cavado induz a formação de sucessivos sistemas frontais que se deslocam sobre o oceano, afastados do continente. No entanto, o processo é o suficiente para intensificar convergência de umidade em baixos níveis sobre a SEB, mantendo um ambiente favorável ao desenvolvimento de instabilidades. A configuração sinótica deste caso ilustra uma das situações associadas ao início e manutenção de um ECP, cujo sistema causador foi classificado como **ZCAS** (episódio de ZCAS sem um sistema sinótico bem definido próximo à SEB). De forma similar ao caso anterior de CI, embora um sistema frontal sobre o oceano tenha contribuído para a reintensificação da atividade convectiva da ZCAS, este se desenvolveu relativamente distante do continente, de tal modo que impactou em menores volumes de chuva na escala de 1 dia, o que destaca a importância da proximidade dos sistemas frontais ao continente na ocorrência de CI. Entretanto, o caráter de estacionariedade da onda sinótica manteve o padrão de circulação associado aos sistemas frontais que favoreceu às condições para a ocorrência de volumes razoáveis de chuva em todos os 4 dias sobre a SEB.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho expôs e analisou as características sinóticas e a variabilidade dos padrões de evolução dos sistemas sinóticos que estão associados à ocorrência de chuva intensa e chuva persistente na SEB, durante a estação chuvosa da região. O estudo considerou eventos de chuva ocorridos no período de 1979 a 2010, durante os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março. A partir da aplicação dos critérios de seleção às séries de precipitação diária, foram identificados 200 dias de chuva intensa e 1268 dias associados à persistência de chuva na SEB. As características sinóticas destes casos foram analisadas comparativamente, a partir de compostos e anomalias de campos de variáveis. Apesar dos compostos corresponderem a casos que ocorrem durante a primavera e verão, optou-se por ponderar os campos de anomalias para filtrar possíveis efeitos sazonais. Em uma segunda etapa, analisou-se a evolução dos campos desde três dias de antecedência e durante os eventos de chuva, sendo esta análise denominada como "episódios", que considerou 133 dos 200 dias de CI e 580 dos 1268 dias de CP. Esta redução foi necessária porque em alguns casos, os dias identificados como um evento de CI ou CP eram a prolongação de um mesmo evento. A análise por episódios consiste em campos dos três dias anteriores e os dias dos eventos de chuva definidos pelos critérios, sendo 1 dia para chuva intensa (CI) e 4 para chuva persistente (CP), o que totaliza uma sequência de 4 campos para os ECI e 7 para os ECP. Na terceira etapa, os episódios foram utilizados para a obtenção dos Padrões de Sequências Principais (PSP) de PNMM, que ilustraram os principais modos de desenvolvimento dos sistemas sinóticos associados a cada tipo de chuva. Os PSP foram obtidos através da aplicação da Análise de Componentes Principais Rotacionadas (ACP) aos campos sequenciais de PNMM para cada conjunto ECI e ECP. Para cada PSP foram gerados compostos de variáveis para determinados níveis de pressão que possibilitaram retrataram o ambiente troposférico de cada padrão.

Distribuição dos eventos de chuva

Verificou-se uma relação inversa entre as distribuições mensais dos casos de CI e CP. Em outubro tem-se a maior frequência de CI, enquanto que neste mês ocorre o mínimo de CP. Nos meses seguintes há uma tendência de diminuição de eventos de CI e de aumento de CP até janeiro, quando neste mês pode ser observada a máxima ocorrência de CP e a

mínima de CI. Em fevereiro notou-se um equilíbrio entre os números de eventos, quando em março, no último mês do período chuvoso, tem-se um máximo secundário de CP e uma discreta diminuição de CI. A análise detalhada do conjunto de casos de CI revelou que 47% destes eventos coincidiram com eventos persistentes de precipitação, sendo que a frequência é mínima em outubro e máxima em março. A contabilização dos sistemas causadores de ECI e ECP entre 1996 e 2010 apontou que os Sistemas Frontais sobre a SEB são mais associados à ocorrência de chuva intensa. Por outro lado, os casos coincidentes de CI em ECP se verificam majoritariamente durante eventos de ZCAS. Os ECP também são associados com ZCAS e ao desenvolvimento de sistemas frontais oceânicos, que favorecem a convergência de umidade sobre a SEB de forma similar a ZCAS, mas que não satisfazem os critérios de classificação, sendo muitas vezes denominados em ambiente operacional como "Zona de Convergência de Umidade" (ZCOU). A diferença entre as distribuições mensais dos eventos de chuva pode ser atribuída às características atmosféricas predominantes em cada mês. Durante a primavera, o ambiente atmosférico sobre a SEB é marcado por contrastes, por ser a transição entre o inverno (seco) e o verão (úmido). Durante os primeiros meses, aproximadamente entre final de setembro e meados de novembro, a região ainda está sujeita às incursões de sistemas frontais eventualmente vigorosos. A substituição gradual do padrão de circulação do ASAS que predomina durante o período seco no inverno sobre a SEB, possibilita a incursão de uma massa mais úmida de origem tropical que irá interagir mais com os sistemas que se desenvolvem próximo à região. Assim, o aquecimento e o aumento de umidade gradual da massa de ar na SEB, aliado às características baroclínicas remanescentes do inverno, determinam ambiente propício para ocorrência de chuva com forte intensidade. No auge do período chuvoso o gradiente térmico sobre a SEB diminui como resposta a restrição espacial sazonal dos sistemas frontais, que durante o verão atuam preferencialmente em latitudes médias e altas, impactando na redução do número de casos de CI. Simultaneamente, verifica-se o aumento da frequência dos eventos persistentes até o máximo em janeiro. Os campos de CP sugerem que, o desenvolvimento de sistemas frontais menos intensos, em um ambiente termodinamicamente favorável, está associado à persistência de chuva na Região. De forma geral, a formação contínua ou o lento deslocamento destes sistemas próximos ao sudeste da AS mantém por um período maior o padrão de circulação associado, que contribui para um período prolongado de chuvas sobre a SEB. Ao final da estação chuvosa, sistemas sinóticos mais vigorosos retornam a atuar sobre a Região, mas

desta vez em um ambiente com mais umidade e termodinamicamente instável, em comparação ao início da estação. Como resultado, verifica-se em março o máximo da ocorrência de chuva intensa em eventos persistentes, além do pico secundário dos casos de CP.

Características sinóticas

Os campos médios para ambos os tipos de chuva apresentam semelhanças nas características e nos sistemas atmosféricos, sendo que a magnitude dos sinais das anomalias é maior para os casos de CI em comparação aos de CP. São características comuns:

a) Difluência do escoamento da borda sudeste da Alta da Bolívia sobre a SEB que favorece a divergência de massa e o movimento vertical ascendente da massa úmida e instável da baixa troposfera.
b) A presença de cavados em níveis médios e altos, associados a um resfriamento anômalo na média e baixa troposfera sobre o sudeste da AS e Atlântico adjacente.
c) Cristas e um aquecimento anômalo na média e baixa troposfera ao sul de 40°S na AS e oceanos adjacentes.
d) Predomínio do escoamento de noroeste, nos compostos de baixos níveis, associado com significativa convergência de umidade específica sobre a SEB.
e) Presença de duas massas de ar com características distintas, sendo úmida e relativamente quente sobre a SEB e uma seca e relativamente mais fria ao norte da Argentina, SUL e Atlântico adjacente.
f) Anomalia negativa de PNMM entre a SEB e oceano; positiva ao sul de 40°S sobre o continente oceanos adjacentes, principalmente sobre o Atlântico.

Os campos sequenciais de anomalias permitiram inferir sobre a evolução temporal das características sinóticas em altos, médios e baixos níveis da troposfera. O desenvolvimento dos ECI está vinculado ao deslocamento dos sistemas sinóticos mais vigorosos, desde a Argentina até a SEB em razão da propagação de um trem de onda de maior amplitude. O ambiente sinótico dos ECP é predominantemente menos baroclínico e o trem de onda associado se desloca de forma mais lenta. De forma geral, um ECP inicia a partir do deslocamento de um distúrbio sinótico ao sul de 50°S que propaga uma onda

secundaria para nordeste. Esta onda secundária reintensifica ou gera um sistema frontal adjacente ao sudeste da AS, cujo padrão de circulação sustenta as condições para chuva na SEB. Embora a distribuição dos sinais anômalos seja semelhante, a magnitude inferior das anomalias sugere que os sistemas sinóticos predominantes nos ECP sejam mais fracos, sendo atribuídos a sistemas frontais fracos, não frontais ou a episódios de ZCAS. Os processos envolvidos na geração destes sistemas sobre o oceano costumam originar uma forte convergência de umidade específica em baixos níveis, que favorecem a ampla ocorrência de precipitação sobre a SEB.

Padrões de circulação

A partir da aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP) às sequências de campos de PNMM dos ECI e ECP, foi possível identificar e reconstruir o ambiente de cinco Padrões de Sequências Principais (PSP) de circulação, associados a cada tipo de episódio de chuva. A tabela 6.3.1 apresenta o resumo das variâncias para cada PSP obtido e os nomes dos processos ou sistemas característicos, que estão associados à ocorrência de chuva em cada padrão.

Tabela 6.1 - Resumo das variâncias explicadas para cada PSP obtido.

ECI			**ECP**		
Ordem	Variância	Nome do Padrão	Ordem	Variância	Nome do Padrão
1° PSP	21,74%	"Sistema Sinótico Oceânico"	1° PSP	20,33%	"ASPS Intenso/Sist. Sinótico Oceânico"
2° PSP	18,99%	"Sistema Frontal"	2° PSP	16,13%	"Cavado SEB"
3º PSP	18,05%	"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"	3º PSP	14,76%	"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB"
4º PSP	7,58%	"Sistema Frontal II"	4º PSP	7,05%	"ASAS/Bloqueio/Cavado SEB II"
5° PSP	6,69%	"Sistema Frontal III"	5° PSP	4,99%	"Ciclones Adjacentes à AS"

Os PSP mostraram que a organização dos sistemas sinóticos em alguns padrões apresenta relativa semelhança para ambos os tipos de chuva. O diferencial entre eles se dá pela intensidade dos sistemas, o que leva a uma carga de variância diferente e determina qual dentre os processos ilustrados tem maior contribuição com a ocorrência de cada tipo de chuva. A obtenção dos padrões de circulação dos ECI corrobora os resultados das magnitudes das composições e anomalias nos quais se verificou que o processo de ocorrência de chuva intensa advém da propagação de um sistema sinótico com caráter baroclínico significativo, visto que as maiores variâncias dos PSP foram atribuídas à

incursão de sistemas frontais sobre a SEB e Atlântico adjacente. Em contrapartida, os PSP de ECP ilustram processos comparativamente menos baroclínicos próximos à região de estudo, o que ficou evidente pela menor magnitude dos compostos e anomalias. Ademais, as classificações sinóticas dos PSP indicaram que, a intensificação dos anticiclones subtropicais do Pacífico e Atlântico ao sul de 40°S durante a primavera e verão estão mais relacionadas com a persistência de chuva na SEB, sendo que sobre o Atlântico a intensificação é vinculada a formação de um anticiclone de tipo bloqueio que se acopla ao ASAS. Tal padrão configura-se a medida que uma onda, composta por uma crista e um cavado, se propaga em níveis médios e altos sobre a metade sul do continente e Oceano Atlântico sul. A crista estabelece o núcleo de um anticiclone ao sul de 40°S no Atlântico, enquanto que o cavado se posiciona adjacente a SUL e a SEB. A dinâmica do cavado contribui para ciclogêneses com características frontais fracas ou eventualmente não frontais, mas que fortalecem a convergência de umidade específica sobre a SEB, resultando na ocorrência das chuvas. O anticiclone atua como um bloqueio dos transientes, de forma que sua estacionariedade favorece a permanência dos processos conducentes às chuvas na SEB e, em alguns casos, determinando um evento de ZCAS.

A presença de um ambiente rico em umidade sobre a metade norte da AS para ambos os tipos de chuva deixa evidente que, a pré-existência de condições termodinâmicas favoráveis sobre a SEB é fundamental para a ocorrência de qualquer tipo de evento de chuva, independente dos padrões de circulação obtidos. A circulação em baixos níveis favorece a esse ambiente, pela advecção de temperatura e umidade da porção central do continente e Amazônia (escoamento noroeste) e injeção de umidade do Atlântico (escoamento sudeste/leste/nordeste). Dessa forma, a contribuição dos padrões de circulação na geração de chuva se dá pelo favorecimento a este tipo de ambiente e pela interação direta dos sistemas associados aos padrões.

Principais modelos de processos sinóticos associados aos episódios de chuva

Com o propósito de compilar os resultados deste trabalho, foram esquematizados os principais modelos de configurações e processos sinóticos associados aos episódios de chuva sobre a SEB. Dentre os cinco PSP obtidos para cada tipo de chuva, consideraram-se os três primeiros que detém as maiores porcentagens de variância explicada. As figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 ilustram os modelos, que foram ordenados de acordo com a porcentagem de variância explicada em cada um deles:

a) 1° MODELO ECI: Sistema Frontal

Ilustra o deslocamento de uma frente fria sobre o SUL e a SEB e um anticiclone migratório pós-frontal definido em sua retaguarda, que favorece o escoamento de sudeste em baixos níveis. O cavado frontal entre a SEB e Atlântico em médios e altos níveis favorece o movimento ascendente da massa de ar úmida em baixos níveis. Esta idealização baseia-se no 2° PSP-ECI ("Sistema Frontal"), que é representado como o modelo mais frequente associado aos ECI. Em virtude da semelhança dos processos sinóticos com os 3° e 4° PSP-ECI ("Sistema Frontal II" e "Sistema Frontal III"), considerou-se somar as variâncias destes padrões ao 2° PSP, o que determinou um valor final superior ao 1° PSP-ECI.

b) 2° MODELO ECI: Sistema Sinótico Oceânico

Baseado no 1° PSP-ECI ("Sistema Sinótico Oceânico"), ilustra o deslocamento de um sistema frontal sobre o Atlântico Sul ao sul de 30°S que organiza o escoamento de noroeste sobre a SEB, promovendo a advecção de temperatura e umidade sobre a SEB. Adicionalmente, a amplificação do cavado frontal em 500 hPa sobre o Atlântico Sul favorece o movimento vertical e aumenta convergência de umidade em baixos níveis entre o leste do Brasil e Atlântico Sul. É um modelo que pode estar associado a episódios de ZCAS.

c) 3° MODELO ECI: ASAS/Bloqueio/ZCAS

Ilustra a intensificação do núcleo do ASAS ao sul de 40°S, que é interpretada como a formação de um anticiclone de tipo bloqueio que se acopla ao subtropical. Esta configuração sobre o oceano favorece a permanência de um cavado sobre a SEB. Em 500 hPa, um cavado com fraco gradiente de altura geopotencial contribui para a geração do cavado em superfície. Verifica-se o escoamento de norte noroeste, que promove a advecção de temperatura e umidade em baixos níveis. As zonas mais baroclínicas situam-se ao sul de 50°S neste padrão. Também é um modelo que pode estar associado à ZCAS.

Figura 6.1 - 1° Modelo de processo sinótico associado aos ECI: “Sistema Frontal”

Figura 6.2 - 2° Modelo de processo sinótico associado aos ECI: “Sistema Sinótico Oceânico”.

Figura 6.3 - 3° Modelo de processo sinótico associado aos ECI: “ASAS/Bloqueio/ZCAS”.

d) 1° MODELO ECP: ASPS Intenso/Sistema Sinótico Oceânico

Ilustra a intensificação do ASPS adjacente à AS, em decorrência da propagação de uma onda sinótica de grande longitude em níveis médios e altos. A estacionariedade desta onda posiciona um cavado entre o sudeste da AS e Atlântico Sul, favorecendo a formação de Sistemas Frontais fracos ou estacionários sobre o oceano. Tais sistemas não atingem à SEB mas organizam o escoamento em baixos níveis de noroeste, que contribui para um ambiente propício para a produção de chuvas pela advecção de temperatura e umidade. É um padrão que pode estar associado a eventos de ZCAS.

e) 2° MODELO ECP: Cavado SEB/ZCAS

A amplificação de um cavado em níveis médios, com fraco gradiente de altura geopotencial entre o SUL e a SEB, induz uma área de baixa pressão em superfície sobre o centro e sudeste da AS, incluindo um cavado sobre a SEB e Atlântico adjacente. O cavado é associado ao desenvolvimento de sistemas frontais fracos ou não frontais sobre o oceano, que favorecem a convergência de umidade específica e a produção de chuvas sobre a região. O núcleo do ASAS define-se de forma alongada com uma crista posicionada ao sul de 40°S e que favorece a permanência da baixa pressão adjacente à SEB, caracterizando um tipo de bloqueio acoplado ao ASAS, embora tal configuração seja mais evidente no 3° MODELO ECP. A persistência das condições de chuva em decorrência do bloqueio pode caracterizar um evento de ZCAS.

f) 3° MODELO ECP: ASAS/Bloqueio/Cavado SEB/ZCAS

É um modelo que apresenta relativa semelhança ao 2° MODELO ECP, sendo que o que os diferencia é o processo de formação do anticiclone de tipo bloqueio sobre o oceano e o maior gradiente de altura geopotencial em níveis médios sobre a SEB. Após o deslocamento de um sistema frontal sobre o Atlântico Sul, o anticiclone migratório funde-se com o ASAS e define seu núcleo ao sul de 40°S. As características deste anticiclone sugere um sistema de tipo bloqueio acoplado ao ASAS, de forma mais definida em comparação ao 2° MODELO ECP. Tal configuração contribui para a permanência de uma área de baixa pressão adjacente a SEB, que é relativa à formação de sistemas frontais fracos ou não frontais.

Figura 6.4 - 1° Modelo de processo sinótico associado aos ECP na SEB: “ASPS Intenso/Sistema Sinótico Oceânico”.

Figura 6.5 - 2° Modelo de processo sinótico associado aos ECP na SEB: “Cavado SEB/ZCAS”.

Figura 6.6 - 3° Modelo de processo sinótico associado aos ECP na SEB: “ASAS/Bloqueio/Cavado SEB/ZCAS”.

Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros

Resumo das principais características associadas:

a) Episódios de Chuva Intensa

- Maior frequência dos eventos na primavera, com máximo em outubro,

- Deslocamento de sistemas sinóticos com características bem definidas ou mais baroclínicos sobre o sudeste da AS.

b) Episódios de Chuva Persistente

- Maior frequência dos eventos no verão, com máximo em janeiro e um pico secundário em março,

- Propagação ou desenvolvimento de sistemas predominantemente menos baroclínicos sobre o sudeste da AS e Atlântico adjacente, em associação com a intensificação do ASPS ou a formação de anticiclones de bloqueio ao sul de 40°S sobre o Atlântico.

O impacto socioeconômico atrelado a um evento significativo de chuva motiva o estudo deste fenômeno, a fim de compreendê-lo e prever sua ocorrência. De forma geral, estudos sinóticos de chuva sobre a SEB optam por classificar os casos de chuva mediante sua intensidade, considerando o volume ocorrido na escala de 1 dia e muitas vezes o denominando como "intensa" ou "extrema". No entanto, a persistência de chuva também é uma característica que deve ser levada em consideração. É sabido que volumes de chuva não necessariamente elevados, mas que ocorrem em dias consecutivos e em uma determinada área, podem causar transtornos como enchentes e deslizamento de encostas. Diante disso, espera-se que este trabalho, além de complementar o conhecimento sobre a chuva intensa, elucide os fatores sinóticos que conduzem à persistência de precipitação e motive o desenvolvimento de novos estudos sobre este tema. Ademais, espera-se que o conhecimento gerado possa contribuir para incrementar a previsibilidade dos ECI e ECP, na forma de informações ao meteorologista previsor e como embasamento para a implementação de ferramentas objetivas, derivadas do pós-processamento de modelos numéricos de tempo e clima, que poderão auxiliar o meteorologista de maneira rápida e

simples, otimizando o monitoramento de tempo e elaboração de avisos e alertas meteorológicos.

Sugere-se como temas para trabalhos futuros:

a) estender o estudo dos eventos persistentes de precipitação para outras regiões, bem como das características sinóticas e padrões de circulação associados.

b) estudar a relação entre as oscilações intrassazonais e a ocorrência dos padrões de circulação.

c) estudo sobre as situações de tipo bloqueio que ocorrem em latitudes subtropicais.

d) subdividir a SEB e estudar possíveis diferenças entre os padrões de circulação. Os critérios para a subdivisão podem ser geográficos, por regime de precipitação ou demográficos (Regiões Metropolitanas).

e) desenvolver uma ferramenta objetiva que compare os dados de saída dos modelos numéricos de tempo e clima com os padrões de circulação obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L.M.; MARENGO, J.A.; CASTRO, C.A.C. Início das chuvas na região Sudeste do Brasil: análise climatológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, dez., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. CD-ROM.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul.** 2005. 185 p. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. Disponível em:<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/Gt9nD>. Acesso em: 17 jul. 2015.

BLUESTEIN, H. B. **Synoptic-dynamic meteorology in mid-latitudes:** observations and theory of weather systems. New York: Oxford University Press, 594 p., 1993.

CARVALHO V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, Cap. 6, p. 95-109, 2009.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LEIBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, Sep. 2002.

CAVALCANTI, I. F. A. et al**. Boletim Climanálise**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil, 1996 a 2010. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/> Acesso em: 25 set. 2015.

CAVALCANTI, I. F. A; KOUSKY, V. E. Frentes Frias Sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, Cap. 9, p. 135-146, 2009.

CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Eventos Extremos de precipitação sobre o sul do Nordeste Brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 1999.

COMPAGNUCCI, R.; ARANEO, D. CANZIANI, P. Principal sequence pattern analysis: A new approach to classifying the evolution of atmospheric systems**.** **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 2, p. 197-217, 2001.

COMPAGNUCCI, R.; SALLES, M.A. Surface pressure patterns during the year over Southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 17, n. 6, p. 635-653, 1997.

COMPAGNUCCI, R. H.; RICHMAN, M. B. Can principal component analysis provide atmospheric circulation or teleconnection patterns? **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 6, p. 703-726, May 2008.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n.1, p. 3171-3185, 2009.

DOLIF, G.; NOBRE, C. A. Improving extreme precipitation forecasts in Rio de Janeiro, Brazil: are synoptic patterns efficient for distinguishing ordinary from heavy rainfall episodes? **Atmos. Sci. Let. Royal Meteorological Society.** v. 13, p. 216-222, 2012.

DOSWELL, C. A.; BROOKS, H. E.; MADDOX, R. A. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. **Weather and Forecasting**, v. 11, n. 4, p. 560-581, Dec. 1996.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões de circulação em superfície e em 500 hPa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no Estado de Minas Gerias Durante o mês de dezembro de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.1, p. 105-124, 2014.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.

ESCOBAR, G. C. J.; CARVALHO DA COSTA, I. Situações meteorológicas associadas a episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). In: CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGÍA, 2005, Buenos Aires. **Anales...** Buenos Aires, 2005.

IDE, F. S.; MACEDO, E. S. Sistemas meteorológicos associados a escorregamentos com vítimas fatais no Estado de São Paulo de 1996 a 2004. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. **Anais…** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 591-691.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Montly Weather Review**, v. 119, p. 1293–1302, 1991.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 1, p. 263-280, Jan. 2003.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. Sudeste do Brasil: uma região de transição no impacto de eventos extremos da Oscilação Sul. Parte I: El Niño. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998, Brasília. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 1998.

GUIA, C. V. F. **Análises das características sinóticas das trejetórias dos ciclones extratropicais que atuam na América do Sul e vizinhanças**. 2011. 120 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.26.17.17-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia)

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38LS7UE>. Acesso em: 17 jul. 2015.

JUNKER, N. W., SCHNEIDER, R. S.; FAUVER, S. L. A study of heavy rainfall events during the great Midwest flood of 1993. **Weather and Forecasting**, v.14, p.701–712, 1999.

HIRATA, F. E.; GRIMM, A. M. The role of synoptic and intraseasonal anomalies in the life cycle of summer rainfall extremes over South America. **Climate Dynamics**, v. v, p. 1-15, 2015.

KODAMA, Y. M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-835, 1992.

KOUSKY, V. E. Pentad Outgoing Longwave Radiation Climatology for the South American Sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 3, p. 217-231, 1988.

LIEBMANN, B.; ALLURED, D. Daily precipitation grids for South America. **Bulletin. American Meteorological Society.** 86, 1567-1570. 2005.

LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Interannual variability of daily extreme precipitation events in State of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, n. 2, p. 208-218, Jan. 2001.

LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Submontly Convective Variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**. v. 12, p. 1877-1891, jul. 1999.

LIMA, K. C. **Episódios de precipitação intensa no sudeste do Brasil e a influência das anomalias de temperatura da superfície do mar e da topografia** 2010. 227 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/06.14.17.11-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37M3ST5>. Acesso em: 17 jul. 2015.

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

MADDOX, R. A.; CHAPPELL, C. F.; HOXIT, L. R. Synoptic and meso-scale aspects of flash flood events. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 60, n. 2, p. 115-123, Feb. 1979.

MADDOX, R. A.; DOSWELL III, C. A. An examination of jet stream configurations 500mb vorticity advection and low-level thermal advection patterns during extended periods of intense convection. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 3, p. 184-197, 1982.

MARCELINO, E. V. (ed.). **Desastres naturais e geotecnologias:** conceitos básicos. - Caderno Didático nº 1. Santa Maria, RS: Inpe/MCT, 2008. v. 1, 40 p. (INPE-15208-PUD/193), 2008. 38 p. 1, 2, 3

MARQUES, R. F. C. **Bloqueio atmosférico no Hemisfério Sul.** 1996. 182 p. (INPE-6742-TDI/632). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao Jose dos Campos, 1996. Disponível em: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GUnzk>. Acesso em: 17 jul. 2015.

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

NOGUÉS-PEAGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279-291, Feb. 1997.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção na Amazônia.** 1986. 134 p. (INPE-4008-TDL/239). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) -| Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1986. Disponível em:<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/HetLL>. Acesso em: 17 jul. 2015.

PEPPLER, R. A. **A review of static stability indices and related thermodynamic parameters**. CHAMPAIGN, IL: Illinois State Water Survey Division, Climate and Meteorology Section**,** 1988. 94 p. Techical Report. ISWS Miscellaneous Publication MP-104.

PINHEIRO, H. R.; ANDRADE, K. M.; MOURA, C. R. W. A Maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE. In**:** SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa/PB. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2011.

QUADRO, M. L. F. **Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 1993. 124 p. (INPE-6341-TDI/593). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1993. Disponível em: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/HgN7e>. Acesso em: 17 jul. 2015.

QUADRO, M. L. F. **Estudo de vórtices ciclônicos de mesoescala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul.** 2012. 158 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-06062012-115400/>. Acesso em: 2015-10-01.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica**. Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010

RICHMAN, M. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, v. 6, n. 3, p. 293-335, 1986.

SACRAMENTO NETO, O. B.; ESCOBAR, G. C. J. ; SILVA, P. E. D. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos - CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2010

SAHA, S., et al. **NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly products, January 1979 to December 2010**. Boulder: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. http://dx.doi.org/10.5065/D69K487J. Acessado em 22 abril 2014.

SAHA, S., et. al. The NCEP Climate forecast system reanalysis. **Bulletin. American Meteorological Society.** v.91, n.8, p. 1015-1057, 2010. (DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1).

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C., SILVA DIAS, P.L. Tropics – South America. In: KAROLY, D. J.; VINCENT, D. G. (Eds.). **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Boston: American Meteorological Society, 1998. Cap. 3, p. 119-139. (Meteorological Monographs, 49).

SATYAMURTY, P.; SOUSA JR, S. B.; TEIXEIRA, M. S.; SILVA, L. E. M. G. Regional circulation differences between a rainy episode and a non-rainy episode in eastern São Paulo state in march 2006. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 404-416, Dec. 2008. 2

SELUCHI, M. E., SERAFINI, Y. V.; TREUT, H. L. The Impact of the Andes on Transient Atmospheric Systems: A Comparision between Observations and GCM Results. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 4, p. 895-912, 1998.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical Applied Climatology**, v. 98, p. 67-77, 2009.

SEVERO, D**. Estudo de casos de chuvas intensas no estado de Santa Catarina.** 1994. 118 p. (INPE-5682-TDI/568). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1994. Disponível em:<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/HgSLp>. Acesso em: 17 jul. 2015.

SIQUEIRA, J. R.; MACHADO, L. A. T. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. **Journal of Climate**, v. 17, n. 9, p. 1754-1766, May 2004.

TEIXEIRA, M. S. **Caracterização física e dinâmica de episódios de chuvas intensas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil**. 2010. 216 p. (sid.inpe.br/mtc-m18@80/2010/02.05.00.27-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/36SUJD2>. Acesso em: 17 jul. 2015.

_____. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960-2004. **Journal of Climate**, v. 24, p. 1913-1921, 2011.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTI, P. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 2, p. 598-617, Feb. 2007.

TRENBERTH, K. E. Blocking in the Southern Hemisphere, **Monthly Weather Review**, v. 113, p. 3-21, jan. 1985

WANG, W.; SEAMAN, N. L. A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. **Monthly Weather Review**, v. 125, febr., 1997.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. Burlington, MA, USA: Elsevier Inc., 2006. 627 p.

APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÕES DE FREQ. E MÉDIAS PONDERADAS

As tabelas a seguir apresentam os valores das distribuições de frequências calculadas, para a definição dos critérios e condições para a seleção dos eventos de Chuvas Persistentes, através da investigação do padrão espacial e temporal da persistência na SEB.

Tabela A1 - Distribuição de frequências e média ponderada de dias com persistência de chuva acima de 1 dia, calculado para cada ponto de grade analisado sobre a SEB.

Dias de persistência	Freq. Abs. (pontos)	Freq. Acum.	Freq. Abs. (%)	Freq. Acum. (%)	Dias x Freq.	Média Ponderada
2	7742	7742	51,5	51,5	15484	**3,05**
3	3522	11264	23,4	74,9	10566	
4	1734	12998	11,5	86,4	6936	
5	919	13917	6,1	92,6	4595	
6	470	14387	3,1	95,7	2820	
7	311	14698	2,1	97,7	2177	
8	153	14851	1,0	98,8	1224	
9	56	14907	0,37	99,1	504	
10	53	14960	0,35	99,5	530	
11	35	14995	0,23	99,7	385	
12	14	15009	0,09	99,8	168	
13	5	15014	0,03	99,8	65	
14	10	15024	0,07	99,9	140	
15	3	15027	0,02	99,9	45	
16	2	15029	0,01	99,9	32	
17	*0*	15029	*0*	99,9	*0*	
18	4	15033	0,03	100,0	72	
19	1	15034	0,01	100,0	19	
20	*0*	15034	*0*	100,0	*0*	
21	*0*	15034	*0*	100,0	*0*	
22	*0*	15034	*0*	100,0	*0*	
23	3	15037	0,02	100,0	69	
> 23	*0*	15037	*0*	100,0	*0*	
TOTAL	**15037**	**15037**	**100,0**	**100,0**	**45831**	**-**

Tabela A2 - Distribuição de frequências e média ponderada de pontos com 4 dias de persistência de chuva, calculado para cada ponto de grade analisado sobre a SEB.

Pontos com 4 dias de persistência de chuva	Freq. Abs.	Freq. Acum.	Freq. Abs. (%)	Freq. Acum. (%)	Pontos x Freq.	Média Ponderada
1	786	786	31,91	31,91	786	**3,46**
2	490	1276	19,89	51,81	980	
3	338	1614	13,72	65,53	1014	
4	212	1826	8,61	74,14	848	
5	180	2006	7,31	81,45	900	
6	126	2132	5,12	86,56	756	
7	74	2206	3,00	89,57	518	
8	68	2274	2,76	92,33	544	
9	47	2321	1,91	94,23	423	
10	35	2356	1,42	95,66	350	
11	35	2391	1,42	97,08	385	
12	19	2410	0,77	97,85	228	
13	15	2425	0,61	98,46	195	
14	12	2437	0,49	98,94	168	
15	12	2449	0,49	99,43	180	
16	7	2456	0,28	99,72	112	
17	1	2457	0,04	99,76	17	
18	2	2459	0,08	99,84	36	
19	3	2462	0,12	99,96	57	
20	1	2463	0,04	100,00	20	
> 20	*0*	2463	*0,00*	100,00	*0*	
TOTAL	**2463**	**2463**	**100**	**100,0**	**8517**	**-**

APÊNDICE B – TABELA DE FASES DO ENOS Vs. ECI E ECP

Tabela B1 - Valores médios do Oceanic Niño Index (ONI), classificação de intensidade do ENOS para a América do Sul, número de dias de chuva e de episódios para cada estação chuvosa analisada.

Oceanic Niño Index (ONI) - Niño 3,4 - médias trimestrais						Intensidade		Dias de chuva		Número de episódios	
Estação Chuvosa	OND	NDJ	DJF	JFM	ONI médio	El Niño	La Niña	INTENSA	PERSIST.	ECI	ECP
79*	-	-	-0,10	0,10	0,00	NEUTRO	NEUTRO	6	38	2	2
79/80	0,50	0,60	0,50	0,40	0,50	FRACO	NEUTRO	2	53	2	6
80/81	0,00	-0,10	-0,40	-0,60	-0,28	NEUTRO	FRACO	6	32	5	4
81/82	-0,20	-0,10	-0,10	0,00	-0,10	NEUTRO	NEUTRO	14	56	7	5
82/83	2,10	2,20	2,20	1,90	2,10	MUITO FORTE	NEUTRO	11	51	7	4
83/84	-0,90	-0,80	-0,50	-0,30	-0,63	NEUTRO	FRACO	6	40	3	5
84/85	-0,90	-1,10	-1,00	-0,90	-0,98	NEUTRO	FRACO	8	54	6	3
85/86	-0,40	-0,40	-0,50	-0,40	-0,43	NEUTRO	NEUTRO	1	48	1	6
86/87	1,10	1,20	1,20	1,30	1,20	MODERADO	NEUTRO	3	38	2	5
87/88	1,30	1,10	0,80	0,50	0,93	FORTE	NEUTRO	6	40	5	4
88/89	-1,90	-1,90	-1,70	-1,50	-1,75	NEUTRO	FORTE	3	30	3	4
89/90	-0,20	-0,10	0,10	0,20	0,00	NEUTRO	NEUTRO	7	44	2	7
90/91	0,40	0,40	0,30	0,20	0,33	NEUTRO	NEUTRO	8	39	5	5
91/92	1,20	1,40	1,60	1,50	1,43	FORTE	NEUTRO	8	37	4	3
92/93	-0,20	0,00	0,20	0,30	0,08	NEUTRO	NEUTRO	7	42	4	4
93/94	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	NEUTRO	NEUTRO	5	22	3	3
94/95	1,00	1,20	1,00	0,80	1,00	MODERADO	NEUTRO	8	38	4	4
95/96	-0,90	-0,90	-0,90	-0,80	-0,88	NEUTRO	FRACO	4	30	3	2
96/97	-0,40	-0,50	-0,50	-0,40	-0,45	NEUTRO	NEUTRO	10	38	5	5
97/98	2,40	2,30	2,20	1,80	2,18	MUITO FORTE	NEUTRO	3	26	2	3
98/99	-1,40	-1,50	-1,50	-1,30	-1,43	NEUTRO	MODERADO	3	42	3	5
99/00	-1,50	-1,70	-1,70	-1,50	-1,60	NEUTRO	FORTE	6	31	5	2
00/01	-0,80	-0,80	-0,70	-0,60	-0,73	NEUTRO	FRACO	6	21	3	4
01/02	-0,30	-0,30	-0,20	0,00	-0,20	NEUTRO	NEUTRO	11	36	9	5
02/03	1,30	1,30	1,10	0,80	1,13	MODERADO	NEUTRO	3	49	2	8
03/04	0,40	0,30	0,30	0,20	0,30	NEUTRO	NEUTRO	7	31	5	3
04/05	0,70	0,70	0,60	0,40	0,60	FRACO	NEUTRO	10	39	7	7
05/06	-0,50	-0,80	-0,90	-0,70	-0,73	NEUTRO	FRACO	3	36	3	4
06/07	1,00	1,00	0,70	0,30	0,75	FRACO	NEUTRO	4	62	4	6
07/08	-1,20	-1,40	-1,50	-1,50	-1,40	NEUTRO	MODERADO	2	34	2	6
08/09	-0,50	-0,70	-0,80	-0,70	-0,68	NEUTRO	FRACO	7	46	6	6
09/10	1,40	1,60	1,60	1,30	1,48	FORTE	NEUTRO	10	30	7	3
10**	-1,50	-1,50	-	-	-1,50	NEUTRO	FORTE	2	15	2	2

Fontes: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
http://enos.cptec.inpe.br/

APÊNDICE C – COMPOSTOS DOS PSP DE ECI

As figuras a seguir reconstroem o ambiente sinótico presente nos cinco padrões de sequências dos ECI, na forma de campos de variáveis representativas no contexto do diagnóstico e prognóstico dos eventos de chuvas. Os compostos foram construídos a partir dos conjuntos de episódios altamente correlacionados com cada PSP de PNMM obtido.

Figura C1 - Compostos dos ECI altamente correlacionados com o 1º PSP. PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (a), convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b), altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (c), vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência de massa [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (d) (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul).

Figura C2 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 2º PSP.

Figura C3 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 3º PSP.

Figura C4 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 4º PSP.

Figura C5 - Similar à figura C1, para os compostos dos ECI altamente correlacionados com o 5º PSP.

APÊNDICE D – COMPOSTOS DOS PSP DOS ECP

As figuras a seguir reconstroem o ambiente sinótico presente nos cinco padrões de sequências dos ECP, na forma de campos de variáveis representativas no contexto do diagnóstico e prognóstico dos eventos de chuvas. Os compostos foram construídos a partir dos conjuntos de episódios altamente correlacionados com cada PSP de PNMM obtido.

Figura D1. - Compostos dos ECP altamente correlacionados com o 1º PSP. PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (a), convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b), altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (c), vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência de massa [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (d) (contorno: valores (+) em vermelho e (–) em azul).

Figura D2 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 2º PSP.

Figura D3 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 3º PSP.

Figura D4 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 4º PSP.

Figura D5 - Similar à figura D1, para os compostos dos ECP altamente correlacionados com o 5º PSP.

APÊNDICE E – COMPOSTOS DOS CASOS ESTUDADOS DE ECI E ECP

Figura E1 - Campos sinóticos da 00 UTC do ECI de 13 de fevereiro de 2009 (dia 0). PNMM [hPa] (contorno) e espessura 500/1000 [dmgp] (sombreado) (a), convergência de umidade específica [10-8 g.(g.s)-1] e vento horizontal [m.s-1] (vetores e linhas de corrente) para 850 hPa (b), altura geopotencial em 500 hPa [dmgp] (c), vento horizontal [m.s-1] (linhas de corrente e sombreado) e divergência de massa [10-5 s-1] para o nível de 200 hPa (d) (contorno vermelho: apenas valores positivos).

Figura E2 - Similar à figura E1, para o ECP de 13 a 16 de janeiro de 2007 (campos da 00 UTC).