

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS - CAMPUS BAURU

DEPARTAMENTO DE FÍSICA E METEOROLOGIA

BACHARELADO EM METEOROLOGIA

JÚLIA CREPALDI MUNHOZ

**PADRÕES SINÓTICOS ASSOCIADOS A CASOS EXTREMOS DE
PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO**

BAURU

2022

JÚLIA CREPALDI MUNHOZ

**PADRÕES SINÓTICOS ASSOCIADOS A CASOS EXTREMOS DE
PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso
de Meteorologia da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Facul-
dade de Ciências, Campus Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Fuchs Bueno
Repinaldo

Coorientadora: Profa. Dra. Marta Pereira
Llopart

BAURU

2022

M966p Munhoz, Júlia Crepaldi
Padrões sinóticos associados a casos extremos de precipitação no
Estado de São Paulo / Júlia Crepaldi Munhoz. -- Bauru, 2022
50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Meteorologia) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências,
Bauru
Orientador: Henrique Fuchs Bueno Repinaldo
Coorientadora: Marta Pereira Llopart

1. Classificação sinótica. 2. Componentes principais. 3. Extremos
chuvosos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer a Deus por ter me concedido sabedoria, força de vontade e ter me proporcionado chegar até aqui, na realização de um sonho.

O meu muito obrigada aos meus familiares, em especial aos meus pais por todo esforço para que eu pudesse ter brilhantes oportunidades no caminho do saber, aos meus avós e ao meu irmão que estiveram presentes comigo nessa jornada me incentivando.

Agradeço aos meus amigos, por sempre estarem do meu lado deixando meus dias mais leves e alegres. Quero agradecer especialmente a Melissa Lopes, minha maior companheira da graduação, amizade essa que quero levar comigo para o resto da vida. Outro agradecimento especial ao Matheus Vale, por sempre ouvir meus desabafos, pelos cuidados comigo e por todo incentivo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa disponibilizada em todo o período desse estudo, ao meu professor e orientador Professor Dr. Henrique Fuchs Bueno Repinaldo e também à minha professora e co-orientadora Profa. Dra. Marta Pereira Llopart por terem aceitado me orientar e acompanhar diante dessa pesquisa, também por todo auxílio, disponibilidade, paciência e pelos ensinamentos passados durante os anos da graduação.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet) pelo auxílio financeiro concedido para a apresentação de um resumo relacionado a essa monografia, no Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET).

A todos os meus docentes da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, por toda dedicação ao saber e pelos aprendizados transmitidos.

Agradeço ao Dr. Ernani de Lima Nascimento e ao Dr. Luiz Felipe Gozzo, que aceitaram contribuir com este trabalho compondo a banca examinadora.

“A ciência não pode prever o que vai acontecer. Só pode prever a probabilidade de algo acontecer”(César Lattes)

Resumo

Neste trabalho foi feito um estudo dos dias em que os eventos de precipitação excederam o percentil de 99% no estado de São Paulo (SP), embasado nos dados das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), entre o período de janeiro de 2010 à dezembro de 2019. Foram analisadas as situações sinóticas através dos campos de pressão ao nível médio do mar (PNMM), campos dinâmicos e termodinâmicos para o dia do evento. Para a obtenção dos padrões da PNMM no dia do evento, foi utilizada a metodologia de Análise de Componentes Principais (ACP). Os resultados mostram os padrões de circulação associados à ocorrência dos eventos extremos de precipitação para o estado de São Paulo que representam aproximadamente 74% dos casos selecionados neste estudo. O primeiro padrão sinótico dominante mostra um sistema frontal estacionário sobre o estado de São Paulo, o segundo padrão que engloba vários casos é uma Zona de Convergência, o terceiro padrão de PNMM é resultante de uma confluência de ventos de uma baixa ao leste dos Andes e a circulação anti-horária da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que carrega umidade para o estado de SP e o quarto padrão adquirido é resultante da umidade trazida da Amazônia e de uma frente fria passageira.

Palavras-chave: Classificação Sinótica; Componentes Principais; Extremos Chuvosos.

Abstract

In this work, a study was made of the days in which precipitation events exceeded the 99% percentile in the state of São Paulo (SP), based on data from the automatic stations of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), between the period from January to from 2010 to December 2019. The synoptic situations were analyzed through the pressure fields at mean sea level (PNMM), dynamic and thermodynamic fields for the day of the event. To obtain the PNMM standards on the day of the event, the Principal Component Analysis (PCA) methodology was used. The results show the circulation patterns associated with the occurrence of extreme precipitation events for the state of São Paulo, which represent approximately 74% of the cases selected in this study. The first dominant synoptic pattern shows a stationary frontal system over the state of São Paulo, the second pattern that encompasses several cases is a Convergence Zone, the third PNMM pattern is the result of a confluence of winds from a low east of the Andes and the counterclockwise circulation of the Subtropical South Atlantic High (ASAS) that carries moisture to the state of SP and the fourth pattern acquired is the result of moisture brought from the Amazon and a passing cold front.

Keywords: Synoptic Classification; Principal Components; Rainy Extremes.

Lista de figuras

Figura 1 – Domínio de estudo no estado de São Paulo - Brasil. Localização das estações automáticas do INMET (pontos azuis). Fonte: Elaborado pelo autor. .	17
Figura 2 – (a) Primeira Componente Principal (CP1); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado com a CP1 (18/03/2017). Fonte: Elaborada pelo autor.	22
Figura 3 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, para o dia mais correlacionado com a Componente Principal 1 (18/03/017). Fonte: Elaborada pelo autor.	23
Figura 4 – (a), (b) e (c) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em (J kg^{-1}), para o dia 18/03/2017, nos respectivos horários 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborada pelo autor.	24
Figura 5 – (a), (b) e (c) Água precipitável na coluna de ar atmosférica, em milímetros (mm), para o dia 18/03/2017, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborada pelo autor.	25
Figura 6 – (a), (b) e (c) Convergência ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) e vetores de velocidades horizontais (m s^{-1}), em 925 hPa, para o dia 18/03/2017, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborada pelo autor.	26
Figura 7 – (a) Segunda Componente Principal (CP2); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado com a CP2 (13/01/2016). Fonte: Elaborado pelo autor.	29
Figura 8 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, do dia mais correlacionado com a CP2 (13/01/2016). Fonte: Elaborado pelo autor.	30
Figura 9 – (a) Campo médio de intensidade do vento (m s^{-1}) e linhas de corrente, em 250 hPa, do dia mais correlacionado com a CP2 (13/01/2016); (b) Temperatura Potencial Equivalente (K) em 850 hPa, às 12Z do dia 13/01/2016. Fonte: Elaborado pelo autor.	31
Figura 10 – (a), (b) e (c) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em (J kg^{-1}), para o dia 13/01/2016, nos respectivos horários 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	32
Figura 11 – (a), (b) e (c) Água precipitável na coluna de ar atmosférico em milímetros (mm), para o dia 13/01/2016, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	33
Figura 12 – (a), (b) e (c) Convergência ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) e vetores de velocidades horizontais (m s^{-1}), em 925 hPa, para o dia 13/01/2016, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	34

Figura 13 – (a) Terceira Componente Principal (CP3); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado com a CP3 (27/01/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.	36
Figura 14 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, do dia mais correlacionado com a CP3 (27/01/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.	37
Figura 15 – (a) e (b) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em (J kg^{-1}), para o dia 27/01/2010, nos respectivos horários 00 e 06Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	38
Figura 16 – (a) e (b) Água precipitável na coluna de ar atmosférico em milímetros (mm), para o dia 27/01/2010, nos respectivos horários sinóticos 00 e 06Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	39
Figura 17 – (a) Quarta Componente Principal (CP4); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado CP4 (17/02/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.	41
Figura 18 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, do dia mais correlacionado com a CP4 (17/02/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.	42
Figura 19 – (a), (b), (c) e (d) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em (J kg^{-1}), para o dia 17/02/2010, nos respectivos horários 00, 06, 12 e 18Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	43
Figura 20 – (a), (b), (c) e (d) Água precipitável na coluna de ar atmosférico em milímetros (mm), para o dia 17/02/2010, nos respectivos horários sinóticos 00, 06, 12 e 18Z. Fonte: Elaborado pelo autor.	44

Lista de abreviaturas e siglas

ACP	Análise de Componentes Principais
AS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CAPE	Energia Potencial Convectiva Disponível
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CP	Componentes Principais
ECMWF	<i>European Centre for Medium Range Weather Forecasts</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JBN	Jato de Baixos Níveis
LI	Linha de Instabilidade
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SP	Estado de São Paulo
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UTC	Coordenada de Tempo Universal
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos Específicos	16
3	DADOS E METODOLOGIA	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1	Análise das Componentes Principais	21
4.1.1	Primeira Componente Principal	22
4.1.2	Segunda Componente Principal	29
4.1.3	Terceira Componente Principal	36
4.1.4	Quarta Componente Principal	41
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	48

1 Introdução

Estudos sobre previsão de eventos meteorológicos extremos são motivados por vasto conjunto de fatores que permeiam diferentes setores, constituindo um dos mais importantes e primordiais assuntos de pesquisas na contemporaneidade (COSTA, 2018). Visto que os impactos econômicos, sociais, industriais, agrícolas e de recursos hídricos relacionados às mudanças climáticas estão aumentando gradualmente nas últimas décadas. O aumento da temperatura a nível global, associado às emissões de gases de efeito estufa, reflete em um aumento de eventos climáticos extremos, tais como: tempestades, chuvas extremas, secas prolongadas, ondas de calor/frio (MEEHL et al., 2007; ALEXANDER et al., 2006; BRITO et al., 2014; IPCC et al., 2013; ALEXANDER, 2016). Temas referentes a extremos de precipitação são de grande importância, em especial em regiões onde as condições atmosféricas são favoráveis para a sua formação (ALVES et al., 2017; MARENGO et al., 2011).

Em um contexto global, mudanças climáticas ocorrendo ao longo de centenas e milhares de anos fazem parte da evolução natural do planeta. A situação surpreendente é a velocidade com que as mudanças estão ocorrendo nos dias atuais, atropelando a variabilidade climática habitual, que designamos como natural, gerando efeitos explícitos como, por exemplo, eventos extremos nas mais diversas regiões geológicas (DIAS, 2014).

Um dos pormenores mais preocupantes das mudanças climáticas são as modificações no ciclo hidrológico, do ponto de vista que a disponibilidade hídrica é totalmente dependente da variabilidade de precipitação em uma determinada região (COSTA, 2018). Embora a tendência e a magnitude das mudanças nas chuvas não sejam conclusivas, elas podem variar de acordo com as estações do ano e com a localização (ALEXANDER et al., 2006; IPCC et al., 2013). Na região sudeste da América do Sul (AS), Dufek e Ambrizzi (2008) encontraram uma predisposição de aumento para os índices anuais de precipitação ao longo dos 30 anos analisados (1961-1990).

Particularmente no estado de São Paulo, a quantidade de dias e a duração de eventos em que ocorrem chuvas extremas tem aumentado consideravelmente, principalmente nas últimas décadas, enquanto que também se observa uma redução na frequência de dias com intensidade leve de chuva (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; MARENGO et al., 2020). A partir de dados de estações meteorológicas situadas no estado de São Paulo, Zilli et al. (2017) encontraram um aumento na quantidade de dias chuvosos com extremos de precipitação nessa região, mostrando uma tendência mais significativa na vizinhança de áreas urbanizadas, inferindo que há interferência antropogênica na frequência com que esses extremos de precipitação estão acontecendo.

Segundo [Reboita et al. \(2010\)](#), em geral, a ocorrência de precipitação na AS sofre influências muito relevantes de vários sistemas sinóticos e de mesoescala, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Ondas de Leste, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Sistemas Frontais, Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Jatós de Altos e Baixos Níveis que contornam a Cordilheira dos Andes, Ciclogênese, Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) e Linhas de Instabilidade (LI).

A ZCAS é responsável por modular 65% dos eventos extremos de chuva no verão do sudeste brasileiro ([CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002](#)). Ela está associada a um escoamento convergente de umidade em baixos níveis, uma circulação anticiclônica (Alta da Bolívia (AB)) e um cavado ou um vórtice ciclônico em altos níveis (VCAN) sobre o Nordeste ([RODRIGUES et al., 2012](#)). Além disso é caracterizada como uma banda de nebulosidade com chuvas persistentes, que se estende desde o sul e leste da Amazônia até a região sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o Atlântico Subtropical ([CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004](#)).

Os SCMs são grandes aglomerados de nuvens convectivas que apresentam área com contínua precipitação (igual ou superior a 100 km em pelo menos uma direção), que pode ser parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva ([HOUZE, 1993](#)). Estes sistemas podem ser classificados principalmente como: Linhas de Instabilidade, Complexos Convectivos de Mesoescala e Bow Echoes. As fortes chuvas oriundas de SCMs costumam estar associadas a inundações, que podem ser desastrosas para o gado, as culturas e a população. Portanto, é importante compreender as características e o papel que os SCMs desempenham no hidroclima subtropical da América do Sul (AS).

Conforme [Vidal \(2014\)](#), a formação de SCMs no estado de São Paulo acontece principalmente nos meses do verão austral, na qual, de acordo com estudos realizados por [Mattos \(2009\)](#) a respeito de 8.158 SCMs, entre os anos de 2005 e 2008, 49% destes sistemas ocorreram no verão, 26% deles aconteceram na primavera, 21% estavam dentro do outono e apenas 3% pertenciam ao inverno. Ademais, o período de maior frequência coincide com a presença da ZCAS ([ROCHA; GANDU, 1996](#); [CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004](#)). Grande parte dos SCMs no estado de São Paulo se manifestam na forma de linhas de instabilidade pré-frontais e CCMs, além disso estão associadas a passagem de sistemas frontais, ciclones extratropicais e circulações de mesoescala ([REBOITA et al., 2010](#)).

Cada vez mais é comum a formação de SCMs acompanhados de fenômenos severos tais como fortes ventos, grandes volumes de chuva e granizo de diversos tamanhos. Diversos estudos têm mostrado que essas condições severas estão fortemente dependentes do modo de convecção encontrado no SCM (e.g., [DIAL; RACY; THOMPSON, 2010](#)), que é em grande parte um fator que depende do cisalhamento vertical

do vento (e.g., [TRAPP, 2013](#)). A partir de uma abordagem baseada em ingredientes, desenvolvida para a região central dos Estados Unidos (e.g., [JOHNS; DOSWELL III, 1992](#); [JOHNSON; MAPES, 2001](#)), pesquisas associaram a formação de tempestades severas a fortes cisalhamentos verticais do vento, à farta presença de umidade na baixa troposfera e altos valores de instabilidade (lapse rate da atmosfera) na média troposfera.

[Mattos et al. \(2020\)](#) estudaram um caso de evento extremo de precipitação no interior do estado de São Paulo em 2017, que ocasionou várias tempestades e até mesmo alagamentos, devido à atuação de um devido à atuação de um SCM multicelular que apresentou centros convectivos com vortacidade ciclônica de mesoescala, ocasionando uma assinatura aparentemente com forma de vírgula (assinatura característica de tempestades excessivas). Os autores observaram que o ambiente sinótico associado a essas tempestades era favorecido por condições moderadas de instabilidade e pelo deslocamento de um cavado, acompanhado de um vórtice ciclônico em níveis médios.

Apesar do enorme impacto social e econômico que os eventos extremos de precipitação, cada vez mais frequentes, podem causar ao estado de São Paulo, ainda há poucos estudos sobre os ambientes de escala sinótica e/ou mesoescala associados a esses extremos na última década.

2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal identificar padrões sinóticos associados a situações extremas de precipitação no estado de São Paulo, durante o período de 01/01/2010 a 31/12/2019.

2.1 Objetivos Específicos

i) Identificar eventos extremos de precipitação diária durante os anos de 2010-2019, superiores ao percentil 99%, através dos dados de estações automáticas disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);

ii) A partir dos dados mais recente de reanálise do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)*, o ERA5, realizar a Análise de Componentes Principais dos eventos extremos de precipitação identificados, caracterizando os sistemas sinóticos e as características físicas das massas de ar;

iii) Desempenhar um estudo das condições dinâmicas e termodinâmicas para cada caso mais correlacionado com a Componente Principal.

3 Dados e Metodologia

Para a identificação dos dias em que a precipitação acumulada diária foi igual ou maior que 1 mm no estado de São Paulo, de 2010-2019, foram utilizados os dados de precipitação horária observados em 43 pluviômetros que fazem parte da rede de estações automáticas do INMET (Figura 1). Deste modo, foram calculados os dados de precipitação acumulada diária (entre 00 e 24 UTC) ao longo de 01/01/2010 à 31/12/2019, totalizando dez anos.

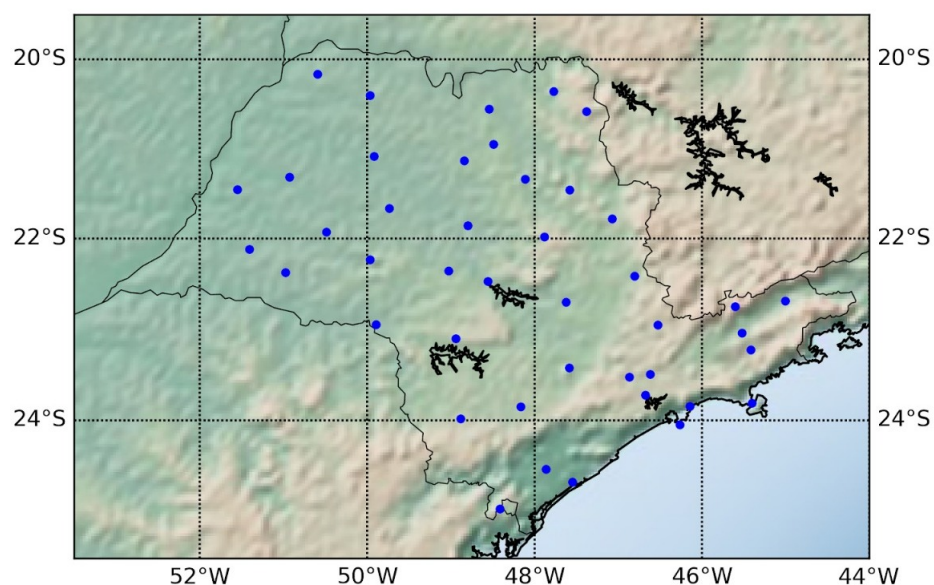


Figura 1 – Domínio de estudo no estado de São Paulo - Brasil. Localização das estações automáticas do INMET (pontos azuis). Fonte: Elaborado pelo autor.

Para estudos meteorológicos, utiliza-se a Coordenada de Tempo Universal (UTC), que obtém como referência o Meridiano de Greenwich (0° de longitude), equivalente ao horário local de Londres. Como a região de estudo compreende longitudes entre 44°W - 52°W, a hora local é de menos 03 UTC ou então menos 03 Zulu (Z), seguindo o horário local de Brasília (DF).

Em seguida determinou-se os dias em que ocorreram os eventos extremos de precipitação. Esses dias de extremos climáticos de precipitação foram obtidos com o auxílio da definição sugerida pelo *The Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI; [SILLMANN et al., 2013](#)) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM; [GIORGI et al., 2014](#)), que define os dias muito chuvosos aqueles em que precipitação diária excede valor do percentil 99% (R99p), considerando apenas os dias úmidos (precipitação igual ou superior a 1 mm dia⁻¹). Para cada dia, foi calculado o valor máximo de precipitação entre todas as estações, obtendo assim um valor diário

de precipitação máxima. A partir desta série temporal de dados, foram obtidos os dias em que a precipitação máxima excedeu o R99p.

Para a determinação dos padrões sinóticos e para os estudos de casos foram utilizados os dados de reanálise ERA5 (HERSBACH et al., 2020). O ERA5 é a mais recente reanálise atmosférica global produzida pelo ECMWF. Esta reanálise fornece estimativas horárias de um grande número de variáveis atmosféricas, de 1979 até o presente, em uma resolução horizontal de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e em 37 níveis de pressão.

Como descrito por Marengo e Alves (2015), os sistemas meteorológicos atuantes no sudeste do Brasil são diversos, com origens e influências também diversas. Muitos trabalhos que realizam o estudo de eventos extremos, se norteiam na análise de composição de casos (composites médios), compreendendo assim, climatologicamente a circulação que está associada a esses episódios por intermédio dos campos médios (ESCOBAR; VAZ; REBOITA, 2019). Entretanto, essa metodologia não é a mais adequada para a identificação dos diferentes padrões associados a eventos extremos de precipitação, pois ao realizar os composites médios se obterá apenas uma média de todas as situações que propiciam a ocorrência de eventos extremos, mas que não seria representativo das diferentes situações associadas a eventos extremos de precipitação. Portanto, para caracterizar os diferentes ambientes de escala sinótica e/ou mesoescala associados aos eventos extremos de precipitação identificados no estado de São Paulo, foi realizada uma classificação sinótica utilizando os campos médios diários da pressão ao nível médio do mar (PNMM) para os eventos selecionados.

A metodologia utilizada foi a Análise de Componentes Principais (ACP) com uma matriz de correlação em Modo - T (GREEN, 1978). Assim, a matriz fica configurada com o campo espacial distribuído nas linhas e os eventos selecionados nas colunas. Este método é o mais apropriado se o objetivo da análise for encontrar padrões sinóticos espaciais e quando eles acontecem no tempo, sendo assim muito útil para sintetizar e reproduzir padrões de circulação (COMPAGNUCCI; SALLES, 1997; ESCOBAR; VAZ; REBOITA, 2019). As pontuações (*scores*) do Modo-T devem ser interpretadas como os padrões espaciais, enquanto que as componentes de peso (*loadings*) das componentes principais (CPs) indicam em que momento os padrões ocorreram.

A partir da determinação das CPs, foram escolhidos os eventos altamente correlacionados com as CPs, utilizando as componentes de peso (*loadings*) que representam as correlações entre cada evento real e cada componente principal. Para cada evento altamente correlacionado, realizou-se a plotagem dos campos dinâmicos e termodinâmicos com os dados de reanálise do ERA5 dos horários sinóticos (00, 06, 12, 18Z).

Por último, obtiveram-se alguns parâmetros dinâmicos e termodinâmicos no horário sinótico mais próximo anterior ao início da maior precipitação acumulada

registrada em uma hora, no dia do evento extremo de precipitação. Utilizou-se esses horários para a análise, pois nesses horários os dados são mais consistentes, visto que nos horários sinóticos. Para isso, plotou-se os dados de Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE), água precipitável na coluna e magnitude da diferença vetorial do vento entre 850-500 hPa, retendo o valor máximo observado em uma caixa de $0,5^\circ$ (lat x lon) em torno da estação que registrou o extremo diário de precipitação.

4 Resultados e Discussões

Na Tabela 1 são mostrados os dias selecionados em que a precipitação máxima diária excedeu o percentil 99% dos dias chuvosos (≥ 1 mm), cujo valor foi de 119,2 mm dia⁻¹. Foram selecionados 28 eventos dos quais 22 se enquadram dentro da estação de verão, dois abrangem a estação do outono e quatro a estação da primavera. Ou seja, nenhum desses eventos com P99 aconteceram durante o inverno.

Tabela 1 – Dias em que a precipitação acumulada foi igual ou superior ao percentil de 99%, dos eventos registrados pelos pluviômetros pertencentes a rede de estações automáticas do INMET, entre o período de 01/01/2010 à 31/12/2019

Evento	Data Medição	Código da Estação	Localidade da Estação	Latitude	Longitude	Pmáx diária (mm dia ⁻¹)	Maior acumulado horário de precipitação (mm h ⁻¹)	Hora do maior acumulado de precipitação (UTC)
1	27/01/2010	A708	Franca	-20,58	-47,38	128,4	35,2	06:00
2	17/02/2010	A745	Moela	-24,05	-46,26	136,2	44,2	00:00
3	25/02/2010	A745	Moela	-24,05	-46,26	191,0	77,6	07:00
4	15/02/2011	A712	Iguape	-24,67	-47,55	136,4	29,6	02:00
5	15/10/2011	A735	José Bonifácio	-21,09	-49,92	137,2	65,6	07:00
6	30/12/2011	A734	Valparaíso	-21,32	-50,93	121,0	74,2	22:00
7	17/12/2012	A734	Valparaíso	-21,32	-50,93	123,6	65,0	18:00
8	11/01/2016	A714	Itapeva	-23,98	-48,89	125,4	14,8	06:00
9	12/01/2016	A741	Barra Bonita	-22,47	-48,56	122,6	58,2	00:00
10	13/01/2016	A753	Ituverava	-20,36	-47,78	137,8	30,4	13:00
11	15/01/2016	A729	Votuporanga	-20,40	-49,97	122,0	45,4	03:00
12	16/01/2017	A701	São Paulo - Mirante	-23,50	-46,62	121,8	64,6	02:00
13	18/01/2017	A705	Bauru	-22,36	-49,03	128,0	55,0	21:00
14	17/03/2017	A765	Bertioga	-23,84	-46,14	142,6	70,6	21:00
15	18/03/2017	A765	Bertioga	-23,84	-46,14	130,4	35,4	16:00
16	14/02/2018	A767	São Sebastião	-23,81	-45,40	190,8	83,6	21:00
17	07/03/2018	A765	Bertioga	-23,84	-46,14	190,4	48,6	23:00
18	20/03/2018	A765	Bertioga	-23,84	-46,14	120,0	72,2	23:00
19	04/11/2018	A753	Ituverava	-20,36	-47,78	177,2	66,4	20:00
20	05/01/2019	A718	Rancharia	-22,37	-50,97	144,4	57,0	07:00
21	25/01/2019	A767	São Sebastião	-23,81	-45,40	125,8	49,4	14:00
22	04/02/2019	A765	Bertioga	-23,84	-46,14	164,8	61,0	06:00
23	16/02/2019	A764	Bebedouro	-20,95	-48,49	151,8	46,4	13:00
24	11/03/2019	A767	São Sebastião	-23,81	-45,40	164,0	35,0	20:00
25	14/03/2019	A768	Tupã	-21,93	-50,49	120,8	96,0	22:00
26	27/03/2019	A712	Iguape	-24,67	-47,55	126,6	36,4	09:00
27	18/05/2019	A766	Registro	-24,53	-47,86	141,2	15,6	00:00
28	15/10/2019	A712	Iguape	-24,67	-47,55	121,6	14,8	23:00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base na Tabela 1, verifica-se que 46% dos casos ocorreram no período da noite e 25% na madrugada, totalizando 71% dos maiores acumulados horários entre o período da noite e da madrugada, dos dias em que os padrões de PNMM estavam suscetíveis a ocorrência de eventos extremos de precipitação. As situações com maior volume acumulado de precipitação em apenas uma hora vão desde 14,8 mm, possivelmente chuvas estratiformes, até 96,0 mm, supostamente sendo causadas por chuvas convectivas.

4.1 Análise das Componentes Principais

Foram estipulados a obtenção de oito componentes principais, pois não existe um modelo estatístico que ajude na decisão de quantas componentes principais se deve obter (VARELLA, 2008). De acordo com REGAZZI (2000), quando se aplica essa análise para diferentes âmbitos do conhecimento, a quantidade de componentes principais utilizadas tem sido aquela que atinge no mínimo 70% da variância acumulada.

Tabela 2 – Porcentagens da variância explicada e da variância acumulada pelas quatro Componentes Principais (CPs).

CPs	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1°	22,9	22,9
2°	20,3	43,2
3°	19,5	62,7
4°	11,6	74,3
5°	6,8	81,2
6°	6,2	87,4
7°	2,9	90,3
8°	2,3	92,6

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise das componentes de peso foi possível avaliar a representatividade dos padrões encontrados como situações sinóticas reais. Valores próximos a 1 indicam que o campo sinótico é similar aos padrões obtidos (HARMAN, 1976; CATTELL, 1978; ESCOBAR; VAZ; REBOITA, 2019). As primeiras quatro componentes apresentam valores superiores a 0,8 (não mostrado) demonstrando que os padrões teóricos e as situações reais têm configurações similares. As demais componentes não foram analisadas pois explicam menos de 7% da variância (Tabela 2) e estão associadas a casos especiais e menos frequentes.

A seguir são apresentadas as 4 primeiras componentes principais, que explicam aproximadamente 74% da variância total (Tabela 2), com seus respectivos casos reais mais correlacionados.

4.1.1 Primeira Componente Principal

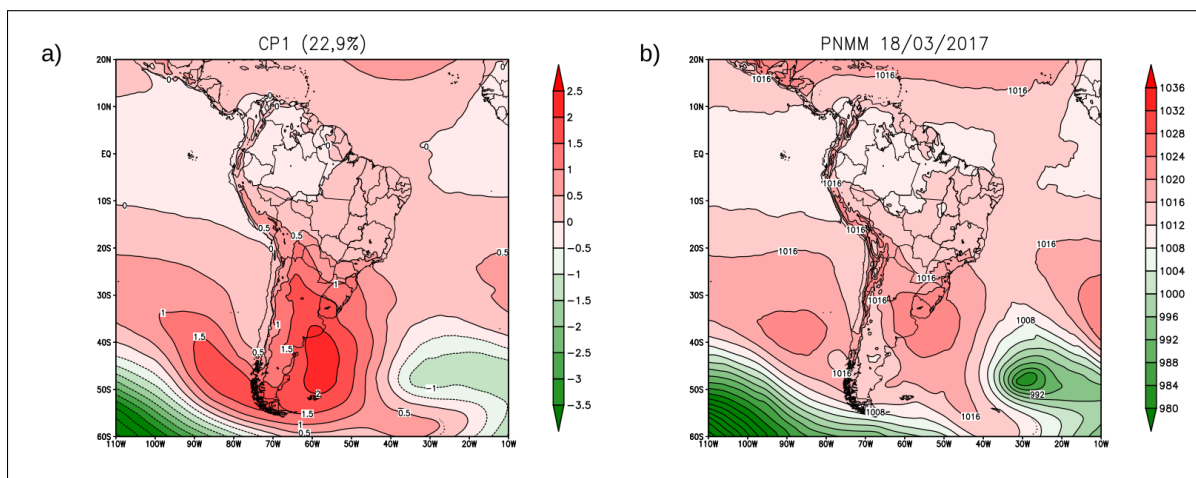


Figura 2 – (a) Primeira Componente Principal (CP1); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado com a CP1 (18/03/2017). Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentre os 28 casos estudados, 22,9% da variância é explicada pela CP1, que possui uma configuração do campo de pressão ao nível médio do mar caracterizada por um cavado frontal sobre o estado de São Paulo. A primeira componente (CP1, Figura 2a) mostra um sistema frontal que se encontra sobre o estado de São Paulo, na qual o ramo frio desse sistema se estende pelo cavado da baixa pressão, onde seu centro está situado em aproximadamente 25°S - 45°W, até a região norte do estado de SP. A Figura 2b mostra o campo médio da PNMM para o dia 18/03/2010, sendo este o caso mais correlacionado (0,86) com a Componente Principal 1 (CP1).

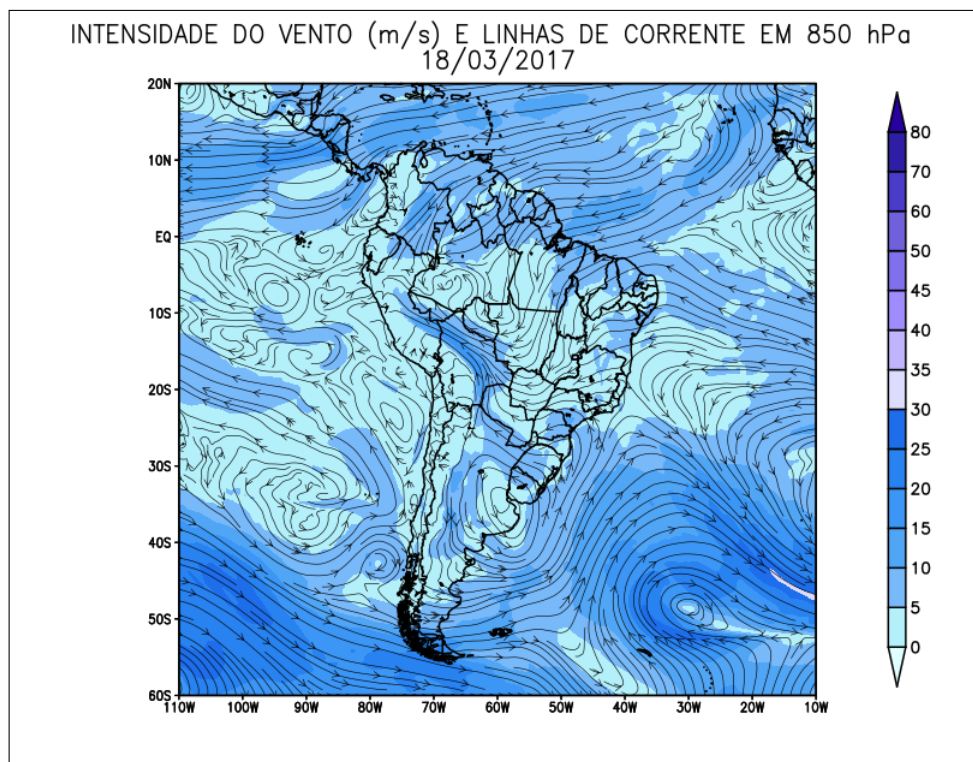


Figura 3 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, para o dia mais correlacionado com a Componente Principal 1 (18/03/017). Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 3 mostra a presença de uma circulação anticiclônica associada a alta pós frontal centrada sobre a Argentina e que estende sua circulação até o estado de São Paulo, favorecendo o ingresso de ar úmido desde o oceano. Também é possível observar a circulação associada ao sistema frontal em superfície, que apresenta um ramo frio sobre o oceano Atlântico e um ramo estacionário sobre o norte do estado de São Paulo.

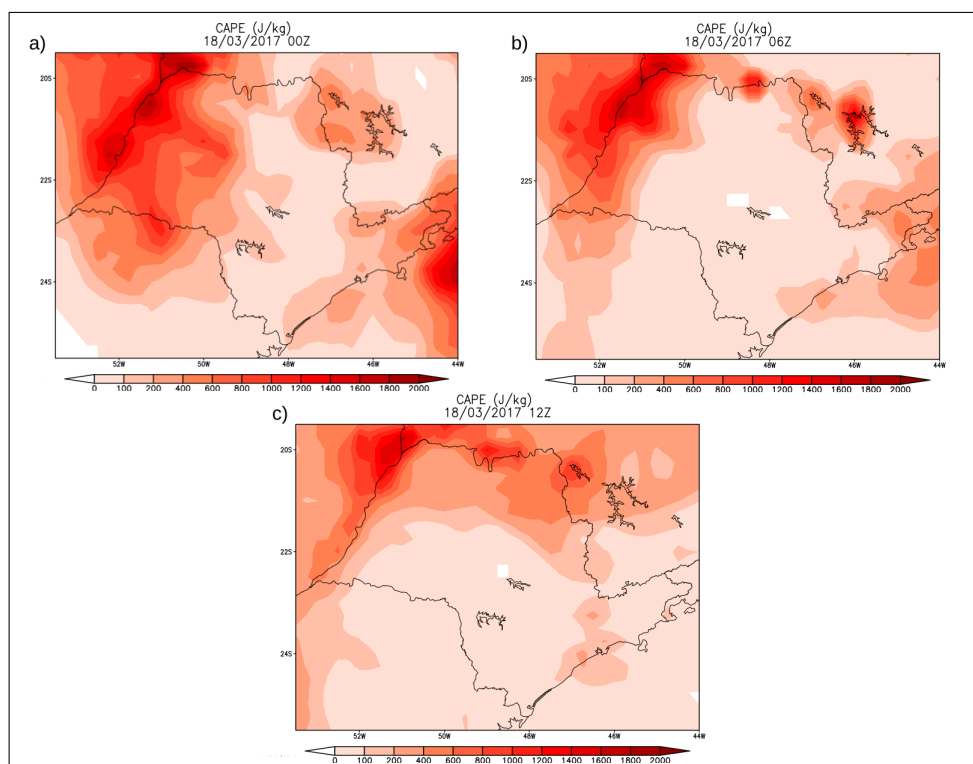


Figura 4 – (a), (b) e (c) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em (J kg^{-1}), para o dia 18/03/2017, nos respectivos horários 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborada pelo autor.

Os campos que representam a instabilidade potencial, são mostrados na Figura 4, com dados também obtidos pelo ERA5. Durante as horas que antecedem o maior acumulado horário do dia 18/03/2017 (35,4 mm), registrado pela estação de Bertioga (litoral de São Paulo), o CAPE da região apresentava valores baixos (entre 200 e 400 J kg^{-1}). Na Figura 4a, observa-se valores de 200 J kg^{-1} até focos com valores acima de 2000 J kg^{-1} na região norte, oeste e na costa leste do estado. Já na Figura 4b aumentam os focos com valores acima de 1400 J kg^{-1} no norte do estado e na faixa litorânea do estado de SP os valores do CAPE ficam entre 100 J kg^{-1} , com focos que se aproximam dos 600 J kg^{-1} . Na Figura 4c, os maiores valores de CAPE se concentram na região norte do estado de SP, com valores que variam de 100 até aproximadamente 1200 J kg^{-1} .

O avanço desse sistema manteve o dia bastante instável em praticamente todo o estado de SP. Os pluviômetros das estações automáticas do INMET, registraram altos valores de precipitação acumulada em todo o estado, registrando um maior acumulado de precipitação, que excedeu o percentil 99%, na estação situada na cidade de Bertioga (A765), no valor de 130,4 mm.

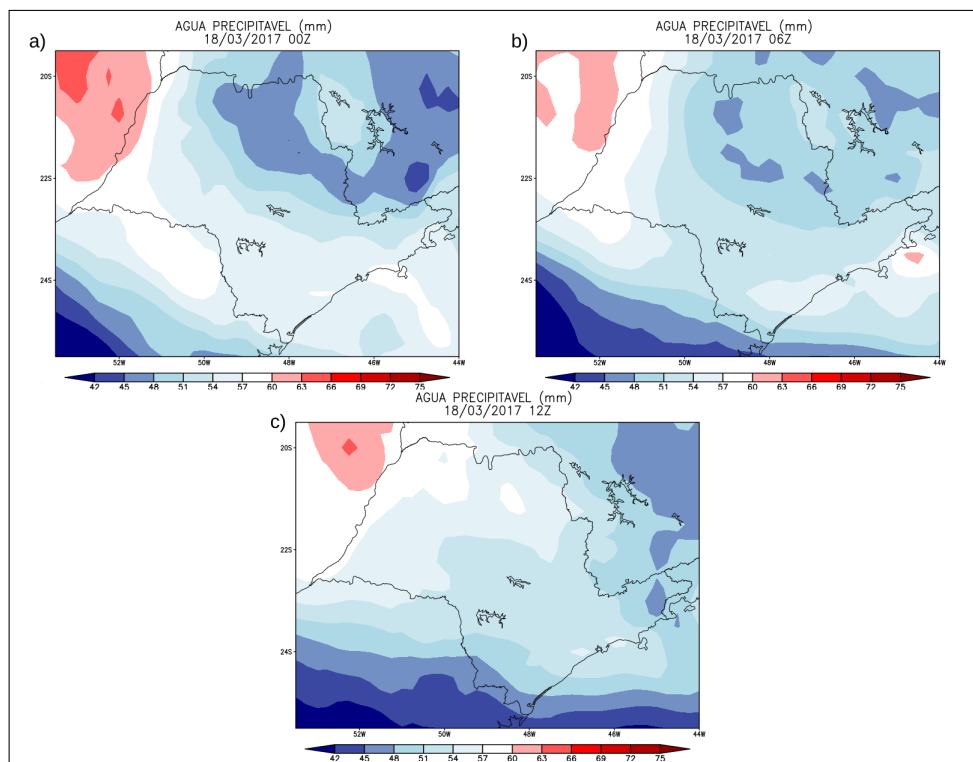


Figura 5 – (a), (b) e (c) Água precipitável na coluna de ar atmosférica, em milímetros (mm), para o dia 18/03/2017, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram utilizados dados do ERA5 para a obtenção da Figura 5, e nela observa-se que desde as 00Z até às 12Z a quantidade de água precipitável na coluna atmosférica aumentou em quase todo estado de SP. Para a região da estação de Bertiooga, na hora sinótica mais próxima do maior acumulado horário, se encontra com valores de aproximadamente 51-54 mm, ou seja, elevados valores de água precipitável. Este aumento de umidade observado é favorecido pela circulação anticiclônica presente no litoral de São Paulo mencionada anteriormente.

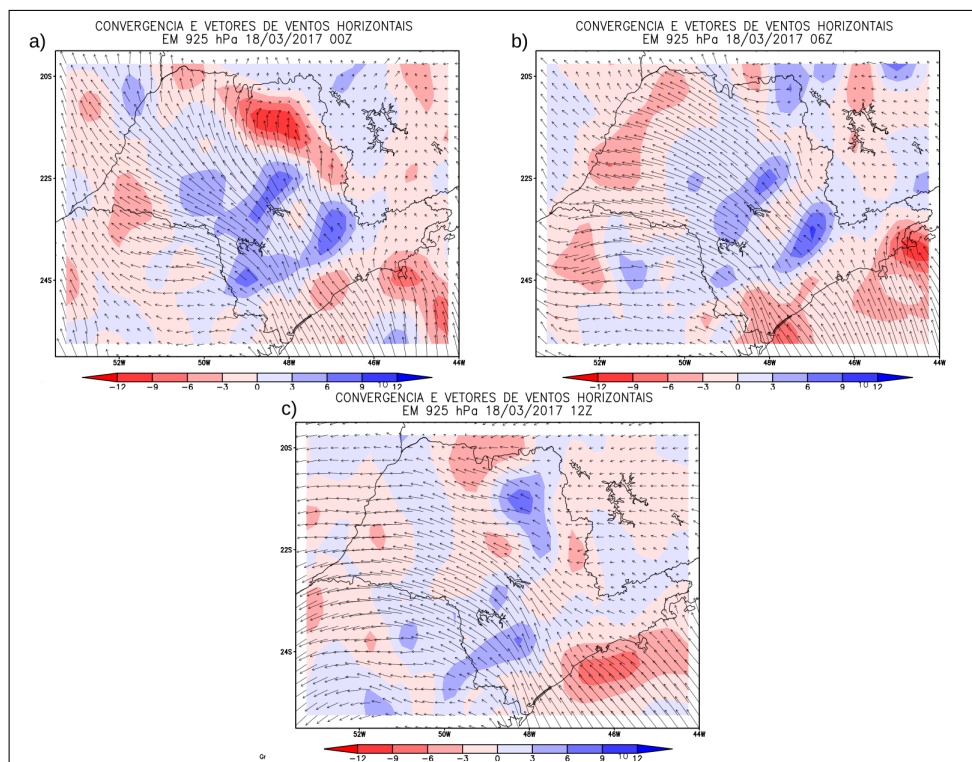


Figura 6 – (a), (b) e (c) Convergência ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) e vetores de velocidades horizontais (m s^{-1}), em 925 hPa, para o dia 18/03/2017, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6 são mostrados os campos de convergência do vento em baixos níveis horas antes do maior acumulado horário. Em todos os três campos, nota-se convergência dos ventos na região litorânea do estado de SP, com maiores valores de convergência na localidade da estação de Bertioga às 00Z e 12Z. O restante do estado registra predominância de divergência na Figura 6a, apenas com altos valores de convergência sobre os municípios do nordeste do estado na Figura 6a.

Na Figura 6b, também há predominância de divergência pelo estado de SP, mas identifica-se uma área de convergência no noroeste do estado. Já na Figura (c), hora sinótica que antecede o maior acumulado horário, observa-se a presença de outros focos de convergência sobre o estado de SP, além da faixa de convergência na costa leste paulista. É importante ressaltar a presença de um fluxo de sudeste em níveis baixos, que favorece o transporte de umidade desde o oceano. Este fluxo pode estar interagindo com a orografia na costa do estado de São Paulo, facilitando o ascenso forçado do ar úmido e favorecendo os altos valores acumulados de precipitação na região.

Sendo assim, investigou-se outros parâmetros que pudessem ter contribuído para a situação do dia 18 de março de 2017 em a precipitação acumulada diária excedeu o percentil 99% no estado de SP. Para isso, plotou-se os campos de magnitude

da diferença vetorial do vento entre 850 - 500 hPa e água precipitável na coluna, para todos os dias que mais se correlacionaram com a CP1.

A magnitude da diferença vetorial do vento foi estudada em uma camada de 500-850 hPa, para evitar que os dados utilizados do ERA5 não fossem reais, devido a topografia do estado de SP. Desse modo, realizou-se a magnitude da diferença vetorial do vento dos médios níveis (500 hPa) até mais ou menos onde se encontram a base das nuvens (850 hPa).

Na Tabela 3, encontram-se os valores das variáveis analisadas para os casos, dentre os 28 eventos que atingiram pelo menos o P99, os que mais se correlacionaram com a CP1, na hora sinótica mais próxima ao horário do maior acumulado horário de precipitação.

Tabela 3 – Valores das forçantes dinâmicas e termodinâmicas, do horário sinótico mais próximo ao maior acumulado horário registrado pelas estações do INMET, dos dias em que a precipitação acumulada foi igual ou superior ao percentil de 99% e que mais estiveram correlacionados com a CP1.

Data	Localização da Estação	Pmáx. diária (mm dia ⁻¹)	Maior acumulado horário de precipitação (mm h ⁻¹)	Água Precipitável (mm)	CAPE (J kg ⁻¹)	Magnitude da diferença vetorial do vento 850-500 hPa (m s ⁻¹)
25/02/2010	Moela	191,0	78,0	65	359	23
17/03/2017	Bertioga	142,6	70,6	55	2324	9
*18/03/2017	Bertioga	130,4	35,4	54	213	11
04/02/2019	Bertioga	164,8	61,0	62	436	21
11/03/2019	São Sebastião	164,0	35,0	55	786	9
14/03/2019	Tupã	120,8	96,0	58	1641	11
27/03/2019	Iguape	126,6	36,4	49	576	27
15/10/2019	Iguape	121,6	14,8	51	33	13

(*)Dia mais correlacionado com a CP1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da Tabela 3, observa-se como se comportou o valor de cada variável, de acordo com o ambiente de escala sinótica, propiciando a ocorrência do maior acumulado de precipitação em apenas uma hora, de um dia em que o percentil foi equivalente ou maior do que 99%.

Nos dias em que o acumulado horário de precipitação alcançou valores entre 61,0 mm e 96,0 mm, observa-se CAPE elevados, ou então uma magnitude da diferença vetorial do vento elevado. Nos dias 25/02/2010 e 04/02/2019, choveu em apenas uma hora cerca de 78,0 mm e 61,0 mm, respectivamente. Nesses dias, o maior CAPE da região se encontrava com valores entre 350 - 440 J kg⁻¹, entretanto a quantidade de água precipitável na coluna eram montantes expressivos, em torno de 62 - 65 mm, além de obterem uma magnitude da diferença vetorial do vento entre 850 - 500 hPa maiores do que 20 m s⁻¹.

Para os dias 17/03/2017 e 14/03/2019, precipitou cerca de 70,6 mm e 96,0 mm,

respectivamente em apenas uma hora de precipitação acumulada. Os valores máximos de CAPE, para o horário que antecedeu esse episódio eram elevados, variando de aproximadamente 1640 a 2330 J kg⁻¹, juntamente com valores de 55 - 58 mm de água precipitável. Mas, para esses casos em que o CAPE foi alto, observa-se que a magnitude da diferença vetorial do vento atingiu valores de 9 a 11 m s⁻¹, valores não tão expressivos contraposto com os dias em que estes atingiram valores superiores a 20 m s⁻¹.

Acumulados horários de precipitação que ocorreram na casa dos 35,0 mm, observa-se valores de CAPE entre 213 - 786 J kg⁻¹, magnitude da diferença vetorial do vento de 9 - 11 m s⁻¹ e água precipitável de 54 - 55 mm, ou seja, valores não muito expressivos tanto para o CAPE quanto para o magnitude da diferença vetorial do vento, quando comparado com os valores que aconteceram com as precipitações horárias mais severas. Em contrapartida, os valores de água precipitável foram similares aos valores que apareceram em dias com maiores acumulados de precipitação em apenas uma hora.

Para o dia 27/03/2019, o valor da água precipitável na coluna foi inferior a 50 mm, com CAPE de 576 J kg⁻¹, mas com uma magnitude da diferença vetorial do vento elevada, de 27 m s⁻¹ na camada de 850 - 500 hPa, resultando em um acumulado horário de 36,4 mm.

Já para o dia 15/10/2019, o CAPE apresentou baixos valores na hora sinótica anterior ao maior acumulado horário, com magnitude da diferença vetorial do vento de 13 m s⁻¹ e água precipitável de 51 mm, valor superior aos 50 mm. Destarte, o acumulado horário de precipitação não foi um valor exorbitante, mas que ao longo do dia rendeu um acumulado de 121,6 mm.

Segundo (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2011) a relação entre o CAPE e o cisalhamento vertical do vento pode ser um indicativo da organização, longevidade e severidade dos sistemas convectivos. Alguns casos que se encontram na Tabela 3, que apresentam grande parte da precipitação diária acumulada em uma hora, estão associados a altos valores de CAPE e baixo cisalhamento vertical do vento, indicando que podem estar associados à convecção do tipo unicelular. Já aqueles casos em que a precipitação se distribui ao longo dia, em geral se observam valores de CAPE mais baixos e alguns casos altos cisalhamentos verticais do vento. Estas características podem estar relacionadas a sistemas mais organizados e duradouros, como os sistemas multicelulares ou associadas a situações pós-frontais de chuva contínua e estratiforme.

4.1.2 Segunda Componente Principal

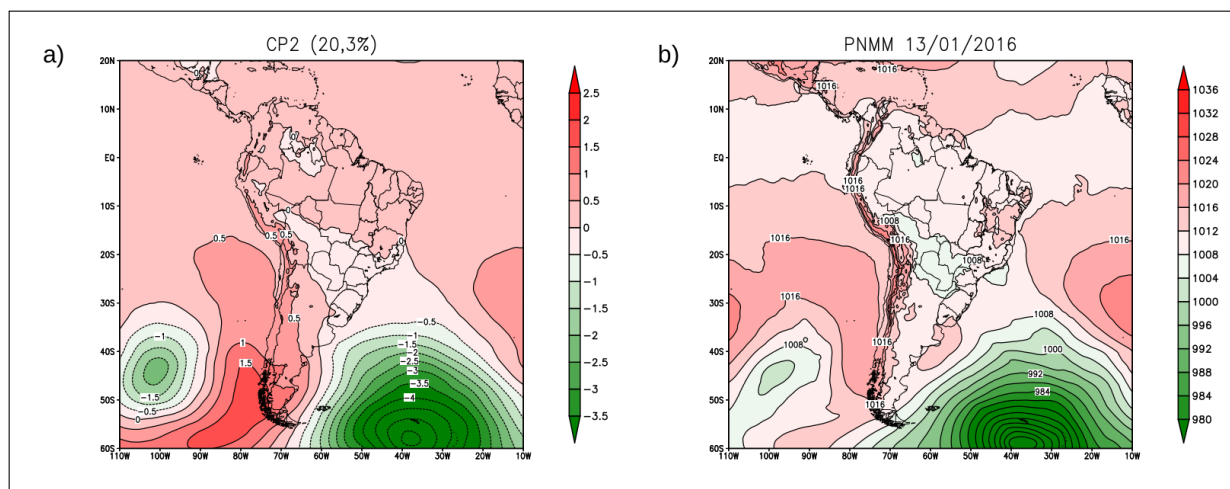


Figura 7 – (a) Segunda Componente Principal (CP2); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado com a CP2 (13/01/2016). Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo padrão sinótico mostrado na Figura 7a (CP2), explica 20,3% da variância dos casos de precipitação extrema selecionados. Sua configuração mostra um grande sistema de baixa pressão situado no Atlântico Sul, com seu centro disposto aproximadamente entre 35°S - 60°W, acompanhado de uma alta pós-frontal e um sistema de alta pressão no Oceano Atlântico Sul, em aproximadamente 20°S - 10°W. Na Figura 7b está representada a PNMM do dia mais correlacionado (0,86) com o padrão apresentado pela CP2 e nela observa-se a atuação da baixa localizada ao Sul do Atlântico Sul e também a atuação da Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

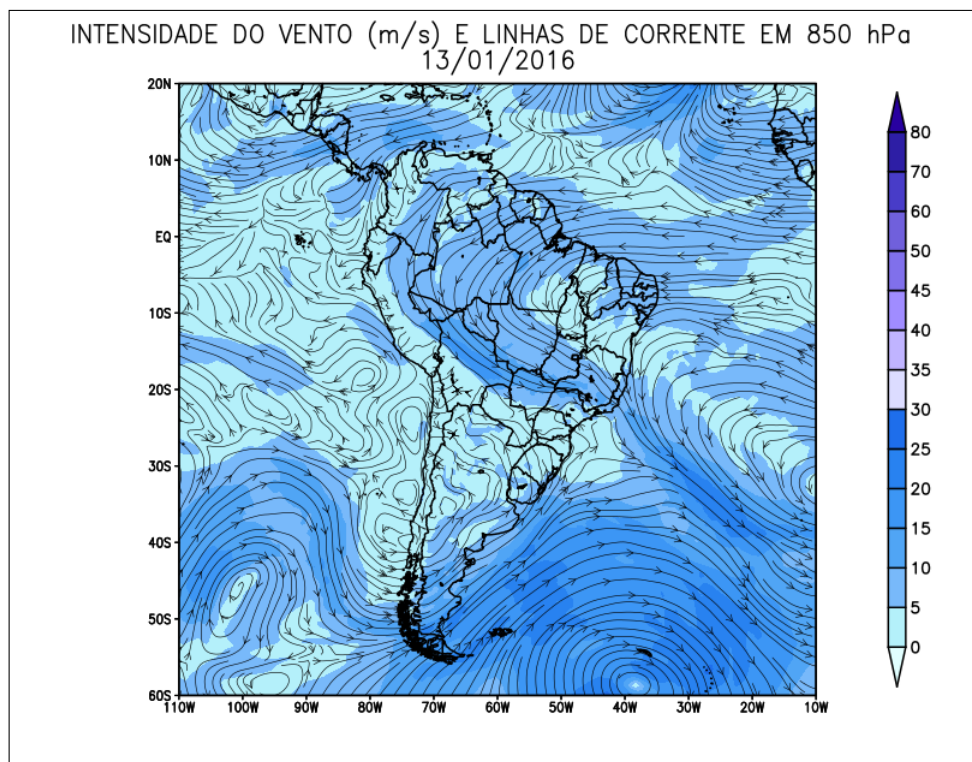


Figura 8 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, do dia mais correlacionado com a CP2 (13/01/2016). Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das linhas de correntes em 850 hPa, ilustrado na Figura 8, observa-se a intrusão dos alísios pelo nordeste brasileiro, passando para a região norte do Brasil, chocando com a Cordilheira dos Andes e posteriormente indo em direção ao sudeste do Brasil. Este fluxo a leste dos Andes, denomina-se de Jato de Baixos Níveis (JBN), de acordo com o primeiro critério de Bonner (BONNER, 1968).

Os JBN podem ser definidos como sistemas com ventos superiores a 10 m s^{-1} , que se encontram entre um ou dois quilômetros (km) acima da superfície e possuem extensão horizontal que se enquadram na mesoescala ou na escala sinótica (aproximadamente 500 km) (SANTOS; CAMPOS; LIMA, 2008). Este intenso escoamento de norte/noroeste, que ocorre a leste dos Andes, o qual se estende desde a região Amazônica até a Bacia do Rio Prata é responsável pelo intenso transporte horizontal de umidade em baixos níveis, e também pelo transporte de momentum e umidade na estrutura vertical, favorecendo o desenvolvimento de convecção.

Ao atingir o Atlântico Sul, observa-se uma Zona de Convergência, em aproximadamente 30°S - 30°W , formada pelo encontro desse JBN, pela circulação horária da baixa pressão no sul do Oceano Atlântico Sul e pela circulação anti-horária da ASAS, dando suporte para a permanência desse corredor de umidade que se estende de norte/noroeste até o sudeste do Brasil.

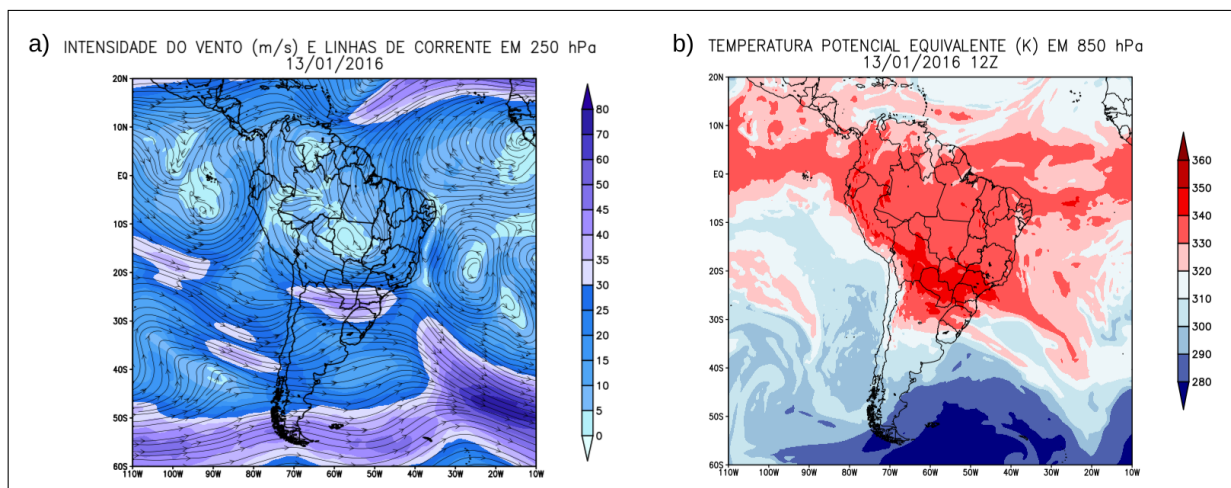


Figura 9 – (a) Campo médio de intensidade do vento (m s^{-1}) e linhas de corrente, em 250 hPa, do dia mais correlacionado com a CP2 (13/01/2016); (b) Temperatura Potencial Equivalente (K) em 850 hPa, às 12Z do dia 13/01/2016. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9a mostra a circulação em altos níveis. É possível observar na figura a circulação anticiclônica associada a Alta da Bolívia (AB) em sua posição climatológica, que se forma principalmente devido a liberação de calor latente na Amazônia (([LENTERS; COOK, 1997](#)), e uma crista com eixo que se estende sobre o sudeste do Brasil. Outros sistemas observados são um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) próximo a costa leste do nordeste e o Jato Subtropical situado em latitudes mais baixas (25°S) também com relação a sua posição climatológica. No nível de 850 hPa (Figura 9b), é possível observar a existência de gradiente horizontal de temperatura potencial equivalente se estendendo desde o oceano até o interior do continente. Esta configuração tanto em baixos e altos níveis é frequentemente observada em episódios de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul; Silva et al., 2019). Além disso, nos dias anteriores e posteriores foram observados também grandes acumulados de precipitação diária, na qual os dias 11/01/2016, 12/01/2016 e 15/01/2016 também estiveram incluídos nos dias de eventos de precipitação que excederam o P99. Além disso, no dia 14/01/2016, apesar de não ter excedido o percentil de 99%, também ocorreu acumulados elevados. Neste dia o maior acumulado registrado no estado de São Paulo, foi na estação da cidade de Itapira (A739), no valor de 87,2 mm. Além disso, segundo ([KODAMA, 1992](#)), o ramo oceânico das ZCAS é vigorosamente modulado pela convergência de umidade no Atlântico Sul.

Esta configuração observada na CP2 é similar a encontrada em episódios de ZCAS, porém não é possível afirmar se esta segunda componente está associada a um padrão de ZCAS, pois seria necessário que este padrão se mantivesse por uma sequência de dias. Sendo assim, o padrão representado pela CP2, trata-se de

um corredor de umidade intenso que persiste sobre o noroeste-sudeste do Brasil, ocasionando grandes acumulados de precipitação nas regiões por onde este sistema se instalará.

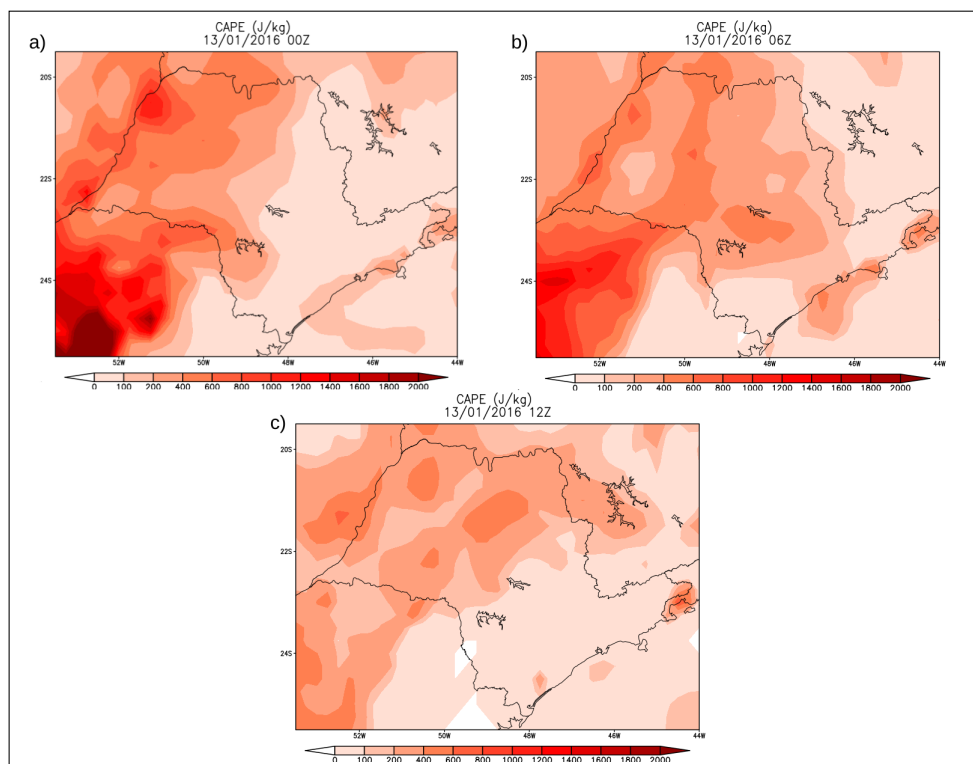


Figura 10 – (a), (b) e (c) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em J kg^{-1} , para o dia 13/01/2016, nos respectivos horários 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 10 mostra os valores de CAPE do dia que mais se correlacionou com a CP2, nas horas anteriores ao maior acumulado horário, ocorrido às 13:00 UTC, no valor de 30,4 mm. No final do dia anterior, mostrado na Figura 9a, se observam valores de CAPE de até 1200 J kg^{-1} na maior parte da região norte, oeste, sudoeste e centro do estado. Durante a madrugada (Figura 10b), os valores do CAPE diminuem um pouco, alcançando valores inferiores a 800 J kg^{-1} . Apesar de ser normal a diminuição do CAPE a medida em que cessa o aquecimento diurno, ele se mantém com valores moderados devido ao fluxo associado ao jato em baixos níveis.

Durante o horário sinótico mais próximo que antecede o maior acumulado do dia, mostrado na Figura 10c, os valores do CAPE se encontram entre 100 a 400 predominantemente na região norte, oeste e parte do centro. Na estação onde ocorreu o evento extremo de precipitação, localizada em Ituverava, no nordeste do estado de SP, o CAPE obtido foi entre 200-400 J kg^{-1} .

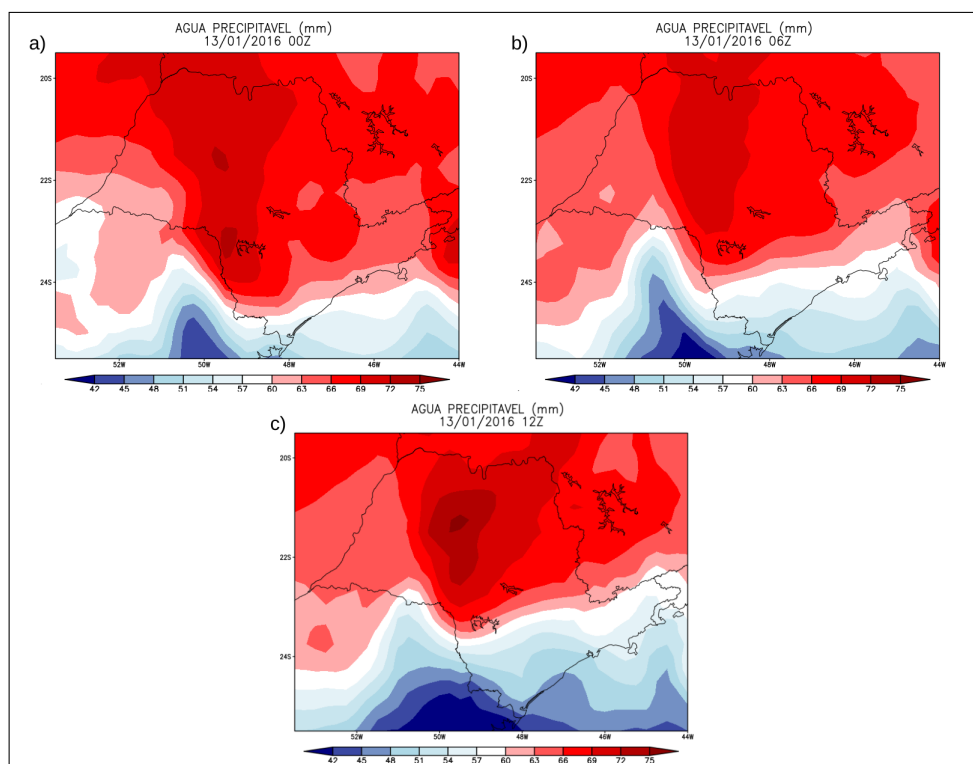


Figura 11 – (a), (b) e (c) Água precipitável na coluna de ar atmosférico em milímetros (mm), para o dia 13/01/2016, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 11, mostra uma grande quantidade de água precipitável na coluna de ar atmosférica, com valores acima de 60 mm em praticamente todo o estado de SP. À medida que as horas foram passando, notou-se uma redução espacial de grande quantidade de água precipitável na coluna da camada na região sul e litoral do estado. Dessa maneira, às 12Z, horário sinótico mais próximo do maior acumulado horário de precipitação, toda a região centro, norte leste e oeste ainda persistiram com elevados valores de água precipitável em toda a coluna, com valores acima de 75 mm, próximo de 21° S - 49° W.

Os valores de água precipitável no horário sinótico mais próximo do maior acumulado horário de precipitação, na estação de Ituverava foi de aproximadamente 72 mm.

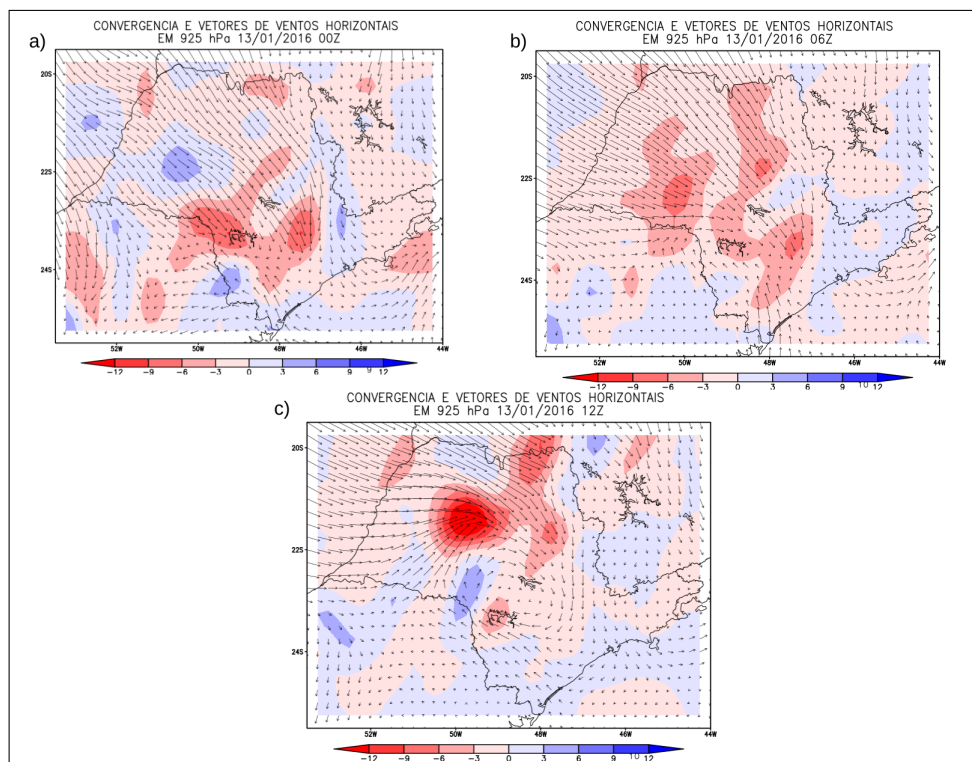


Figura 12 – (a), (b) e (c) Convergência ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) e vetores de velocidades horizontais (m s^{-1}), em 925 hPa, para o dia 13/01/2016, nos respectivos horários sinóticos 00, 06 e 12Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os campos apresentados na Figura 12, mostram como se comportou a convergência dos ventos em 925 hPa, horas antes do maior volume acumulado horário de precipitação. Sendo assim, analisa-se por intermédio da Figura 12a baixas convergências em partes da região norte e maiores convergências mais ao sul do estado de SP. Já através da Figura 12b, é possível notar que aumentaram as regiões convergentes sobre o estado, além de aumentar os valores observados de convergência do vento nas regiões do quadrante norte do estado de SP. Na Figura 12c os maiores centros de convergência em baixos níveis se concentram sobre o norte do estado, inclusive sobre a estação de Ituverava, na hora anterior ao acontecimento do maior volume acumulado de precipitação horária, dado que esse maior acumulado horário de precipitação ocorreu às 13Z.

Assim como foi realizado para a CP1, agrupou-se os dias que mais se correlacionaram com a CP2 e analisou-se o cisalhamento em 850-500 hPa, a água precipitável na coluna e o CAPE. Essas informações foram coletadas na hora sinótica mais próxima ao maior acumulado horário de chuva, e são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores das forçantes dinâmicas e termodinâmicas, do horário sinótico mais próximo ao maior acumulado horário registrado pelas estações do INMET, dos dias em que a precipitação acumulada foi igual ou superior ao percentil de 99% e que mais estiveram correlacionados com a CP2.

Data	Localização da Estação	Pmáx. diária (mm dia ⁻¹)	Maior acumulado horário de precipitação (mm h ⁻¹)	Água Precipitável (mm)	CAPE (J kg ⁻¹)	Magnitude da diferença vetorial do vento 850-500 hPa (m s ⁻¹)
11/01/2016	Itapeva	125,4	15,0	67	256	25
12/01/2016	Barra Bonita	122,6	58,2	70	1007	13
*13/01/2016	Ituverava	137,8	30,4	72	366	13
15/01/2016	Votuporanga	122,0	45,4	72	354	12
20/03/2018	Bertioga	120,0	72,2	60	4526	10
11/03/2019	São Sebastião	164,0	35,0	55	786	9
16/02/2019	Bebedouro	151,8	46,4	62	131	28

(*)Dia mais correlacionado com a CP2.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em todos os casos ocorridos associado ao padrão sinótico encontrado na CP2, se observaram valores de água precipitável superiores a 60 mm. Nos dias em que o valor de água precipitável foi de 72 mm, os valores do CAPE e de magnitude da diferença vetorial do vento foram de 354 - 366 J kg⁻¹ e 12 - 13 m s⁻¹, respectivamente, obtiveram valores de acumulados de precipitação horária de 30,4 e 45,4 mm.

Nos dias em que o valor de água precipitável esteve entre 62 - 67 mm e o CAPE entre 131 - 256 J kg⁻¹, os valores de cisalhamento entre 850 - 500 hPa foram elevados, em torno de 25- 28 m s⁻¹.

Nos dias em que o maior acumulado de precipitação horária foi de 72,2 mm e 58,2 mm, o CAPE a 50 km nas proximidades da estação atingiu valores superiores a 1000 J kg⁻¹, os valores do cisalhamento foi em torno de 10 - 13 m s⁻¹, visto que os valores de água precipitável para esse padrão são maiores do que 60 mm.

O dia mais correlacionado com os padrões exibidos na CP2, também apresentou baixo valor de CAPE para o horário sinótico mais próximo do maior acumulado horário.

A partir destes resultados é possível observar que quando a maior parte do acumulado diário ocorre em uma hora, em geral os valores do CAPE são altos e o cisalhamento vertical do vento é baixo. Como mencionado anteriormente, esta é uma característica que pode estar associada a ocorrência de sistemas de curta duração, como os sistemas unicelulares.

4.1.3 Terceira Componente Principal

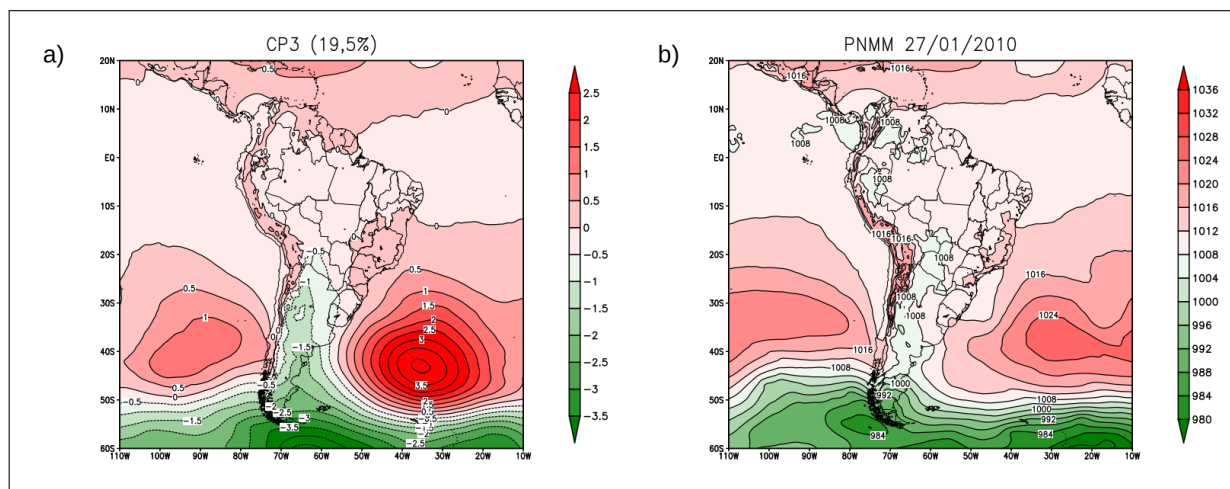


Figura 13 – (a) Terceira Componente Principal (CP3); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado com a CP3 (27/01/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.

O terceiro padrão sinótico mostrado na Figura 13a (CP3), explica 19,5% da variância dos casos de precipitação extrema selecionados. Na CP3, observa-se uma circulação anticiclônica atuante sobre quase toda costa leste do Brasil associada ao ASAS, além de regiões de baixas pressões, localizadas a leste da Cordilheira dos Andes. Estas baixas pressões estão associadas às baixas termo-orográficas conhecidas como Baixa do Chaco e Baixa do Noroeste Argentino. Diferentemente dos outros padrões encontrados, a presença de sistemas frontais frios neste padrão se encontra limitada a latitudes mais altas.

A Figura 13b, expõem o campo de PNMM do dia 27/01/2010, ou seja, o dia em que mais se correlacionou com o padrão apresentado na CP3 (0,79). Neste dia, observa-se a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre a costa leste do Brasil, juntamente com o sistema de baixa pressão que se estende de baixa latitudes, passando pelo oeste da Argentina, atingindo o sudeste da Bolívia, o sudoeste do Mato Grosso e a região noroeste do Mato Grosso do Sul.

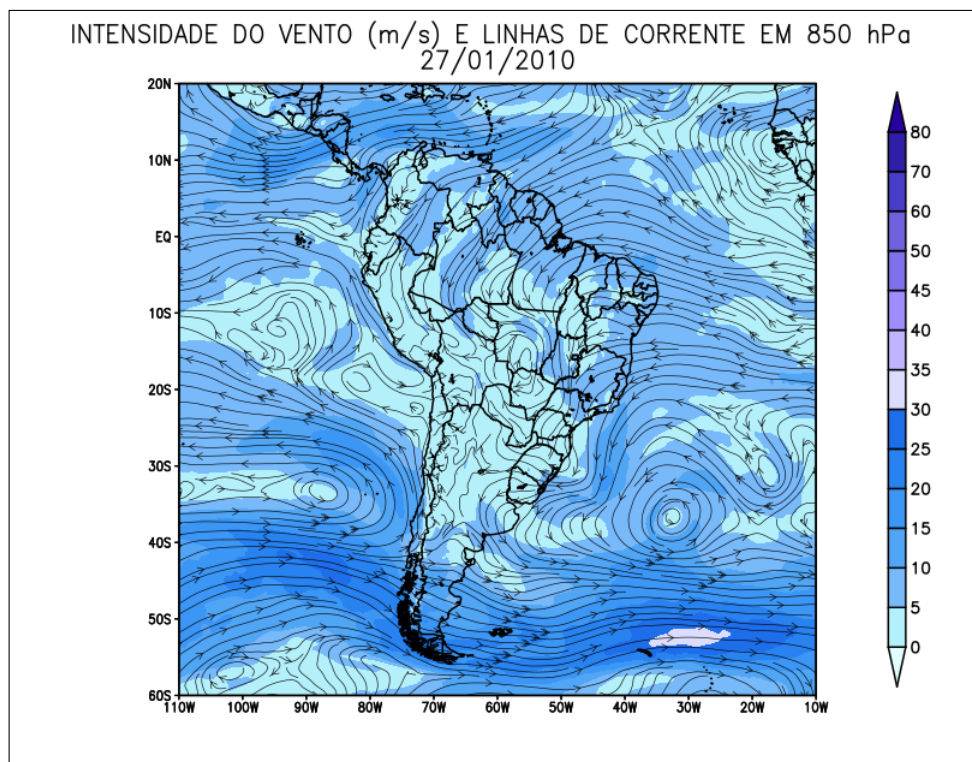


Figura 14 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, do dia mais correlacionado com a CP3 (27/01/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.

Mediante a Figura 14, verifica-se uma circulação de baixa pressão que atinge a região centro-oeste do Brasil e também se localiza uma circulação anticiclônica (ASAS), exposta na Figura 14b, em aproximadamente 30°S - 30°W , que se estende na região sudeste e nordeste do continente, com predominância de ventos ocidentais no lado polar da alta e ventos alísios no lado equatorial. Essas duas circulações associadas (baixa no centro-oeste e alta no Atlântico Sul), propicia a convergência em baixos níveis de ar úmido nas regiões onde há confluência desses ventos. Esta configuração propicia um transporte de umidade desde a Amazônia pela circulação ciclônica, e desde o oceano pela circulação anticiclônica. A confluência destas duas correntes sobre o estado de São Paulo propicia tanto o forçante dinâmico quanto o aporte de umidade para os eventos extremos de precipitação. Esta configuração com a posição da ASAS deslocada mais para o leste e com ventos mais fracos, durante o verão austral, contribui para o aumento da umidade sobre o continente (REBOITA et al., 2010).

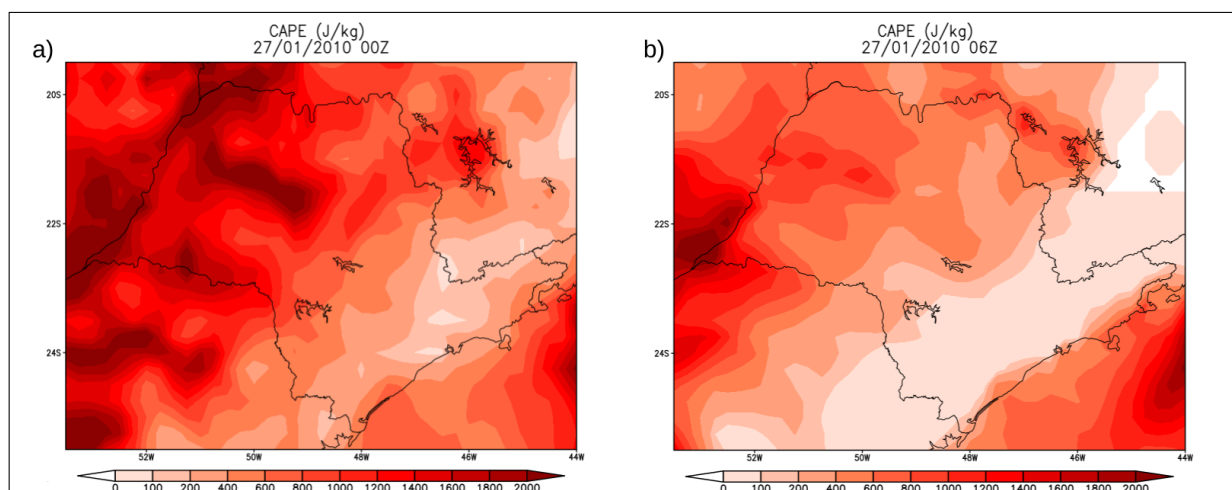


Figura 15 – (a) e (b) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em J kg^{-1} , para o dia 27/01/2010, nos respectivos horários 00 e 06Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

O maior acumulado de precipitação horária do dia 27/01/2010 ocorreu logo pela madrugada, ou seja, 06Z (03:00 no horário local de estudo). Durante este período as condições de instabilidade para o estado de São Paulo apresentaram valores de CAPE superiores a 2000 J kg^{-1} , principalmente nas horas prévias à precipitação máxima horária acumulada (Figura 15a). Já no horário do maior acumulado horário (Figura 15b), o CAPE ainda permanece maior no norte e oeste do estado, mas com valores reduzidos, em torno de $800\text{-}1000 \text{ J kg}^{-1}$.

A estação, que registrou 125,8 mm no dia 27/01/2010, está instalada na cidade de Franca, situada na região nordeste do estado de SP, onde o CAPE na hora que ocorreu o maior acumulado horário de precipitação compreendia valores entre $400\text{-}600 \text{ J kg}^{-1}$.

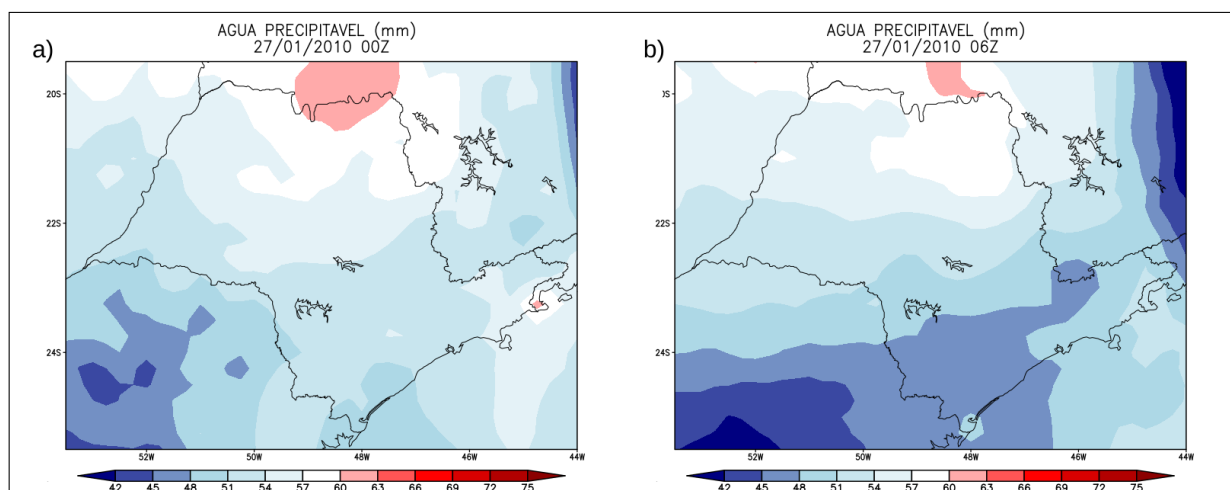


Figura 16 – (a) e (b) Água precipitável na coluna de ar atmosférico em milímetros (mm), para o dia 27/01/2010, nos respectivos horários sinóticos 00 e 06Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16a mostra a quantidade de água precipitável na coluna da camada horas que antecede o maior acumulado horário de precipitação, que ocorreu às 18Z, coincidentemente no próximo horário que se obtém análise sinótica, do dia mais correlacionado com a CP3. Observa-se valores crescentes de sul a norte do estado de São Paulo, com valores entre 48 e 60 mm, com máximo logo acima da região nordeste do estado, indicando valores entre 60 - 63 mm de água precipitável.

Já na Figura 16b, retrata a hora que realmente aconteceu o maior acumulado horário no dia 27/01/2010. Nesta figura, observa-se um padrão parecido com o da Figura 16a sobre o estado de São Paulo, entretanto, variando entre 45 e 60 mm, do sul ao norte do estado de São Paulo. A região de máximo observada na figura anterior, está bem reduzida e praticamente não está mais sobre o estado de São Paulo. Neste horário, verifica-se que a maior quantidade de água precipitável sobre a estação A708, situada em Franca, foi entre 57 - 60 mm.

Para este padrão sinótico também foi analisado como se comportaram os valores das variáveis de magnitude da diferença vetorial do vento em 850 - 500 hPa, água precipitável na coluna e o CAPE, tomando os maiores valores observados em uma caixa de $0,5^\circ$ à volta da estação. Essa análise foi feita para todos os dias que mais estiveram correlacionados com a CP3, no horário sinótico mais próximo do maior acumulado de precipitação ocorrido em uma hora. Na Tabela 5 se encontram os valores encontrados com base nessa análise.

Tabela 5 – Valores das forçantes dinâmicas e termodinâmicas, do horário sinótico mais próximo ao maior acumulado horário registrado pelas estações do INMET, dos dias em que a precipitação acumulada foi igual ou superior ao percentil de 99% e que mais estiveram correlacionados com a CP3.

Data	Localização da Estação	Pmáx. diária (mm dia ⁻¹)	Maior acumulado horário de precipitação (mm h ⁻¹)	Água Precipitável (mm)	CAPE (J kg ⁻¹)	Magnitude da diferença vetorial do vento 850-500 hPa (m s ⁻¹)
*27/01/2010	Franca	128,4	35,0	59	1131	15
15/10/2011	José Bonifácio	137,2	65,6	62	679	17
30/12/2011	Valparaíso	121,0	74,2	55	1487	8
16/01/2017	São Paulo-Mirante	121,8	64,6	60	1034	5
14/02/2018	São Sebastião	190,8	83,6	57	1211	16
25/01/2019	São Sebastião	125,8	49,4	59	2839	14
18/05/2019	Registro	141,2	15,6	48	437	11

(*)Dia mais correlacionado com a CP3.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste padrão, nenhum dos casos expostos na Tabela 5 excedeu os 17 m s⁻¹ de magnitude da diferença vetorial do vento entre a camada de 850 e 500 hPa, enquanto que os valores observados de água precipitável ficaram entre 48 e 62 mm.

O menor acumulado de precipitação horário (15,6 mm h⁻¹) ocorreu no dia 18/05/2019, com um CAPE de 437 J kg⁻¹, com uma magnitude da diferença vetorial do vento de 11 m s⁻¹ e com 48,0 mm de água precipitável na coluna. Ou seja, um baixo acumulado horário, visto que o montante de precipitação ao longo do dia foi de 141,2 mm. Esses valores indicam que na maior parte do dia a precipitação predominante do dia foi do tipo estratiforme, isto é, chuvas constantes o dia todo sobre a região da estação onde foi registrado o valor extremo.

Já o maior acumulado registrado em um hora, ocorreu no dia 14/02/2018, na estação localizada na cidade de São Sebastião, no valor de 83,6 mm h⁻¹. Os valores das variáveis mostradas na tabela 4, que permeavam a localidade da estação na hora sinótica anterior a este acumulado, foram de 1211 J kg⁻¹ de CAPE, 16 m s⁻¹ de cisalhamento entre 850 - 500 hPa e de 57 mm de água precipitável na coluna atmosférica.

Para o dia 27/01/2010, dia que mais se equipara com o padrão de pressão encontrado (CP3), o valor do CAPE foi de 1131 J kg⁻¹, a magnitude da diferença vetorial do vento de 850 - 500 hPa de 15 m s⁻¹ e 59 mm de água precipitável na coluna de ar atmosférico. Esses máximos valores obtidos nas proximidades da estação A708 na hora sinótica mais próxima ao maior acumulado horário de precipitação, permitiram com que a estação de Franca registrasse um maior acumulado horário de 35,0 mm e um maior acumulado diário de 128,4 mm. Pelo fato do valor do CAPE ter sido elevado para o horário sinótico mais perto do maior acumulado horário do dia 27/02/2010, é provável que essa precipitação esteja relacionada com células unicelulares.

4.1.4 Quarta Componente Principal

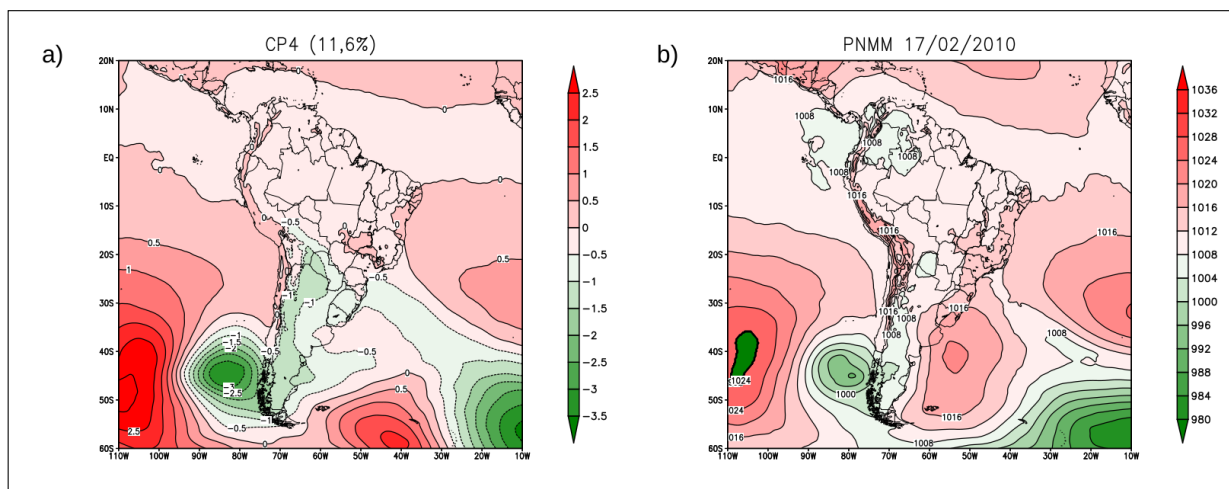


Figura 17 – (a) Quarta Componente Principal (CP4); (b) pressão ao nível médio do mar (PNMM) de um evento altamente correlacionado CP4 (17/02/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.

O quarto padrão sinótico mostrado na Figura 17a (CP4), explica 11,6% da variância dos casos de precipitação extrema selecionados. Este quarto padrão está composto por um sistema frontal que se encontra localizado ao sul do estado de São Paulo, entre a alta pós-frontal e a circulação associada à ASAS. Na Figura 17b, é mostrado o campo de PNMM para o dia que mais correlacionado com a CP4 (0,81), e nela observa-se uma frente fria avançando sobre o oceano Atlântico, ao leste do estados do Paraná e de São Paulo. Logo na retaguarda se observa sobre o sul do Brasil, Uruguai e costa da Argentina, a presença da alta pós-frontal. Ao norte do sistema frontal se localiza a ASAS.

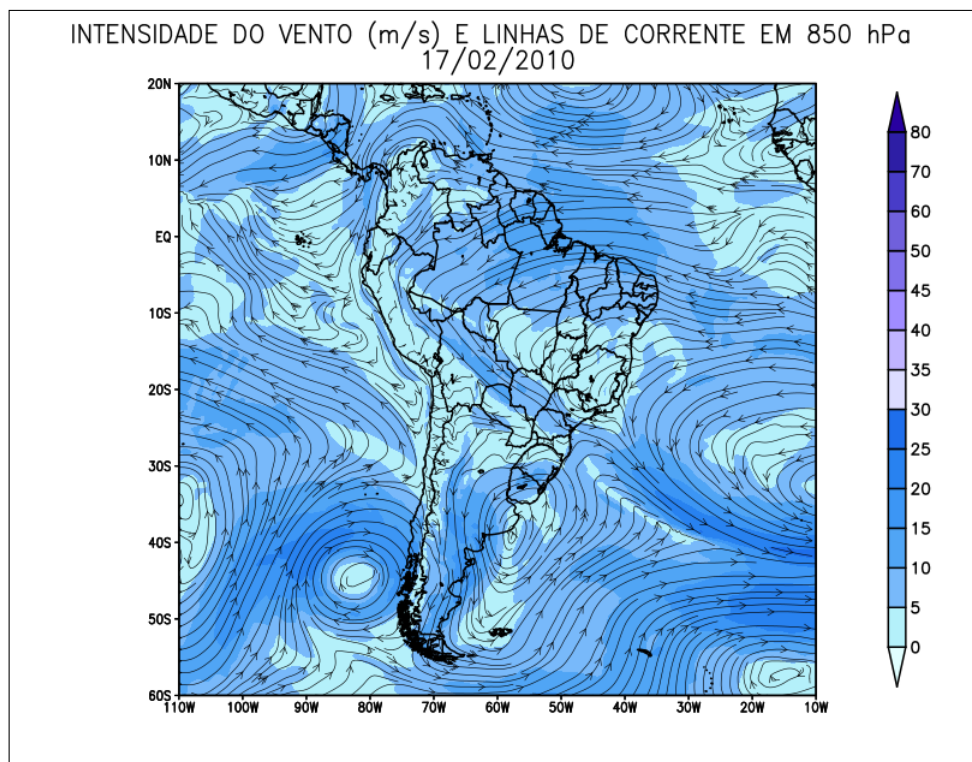


Figura 18 – Média diária de intensidade do vento (m s^{-1}) e das linhas de corrente, em 850 hPa, do dia mais correlacionado com a CP4 (17/02/2010). Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelas linhas de corrente e intensidade do vento mostrados na Figura 18, identifica-se a presença de um escoamento a leste da Cordilheira dos Andes, passando pelo norte/noroeste do Brasil formando um corredor carregado de umidade trazida pelos ventos alísios, que segue em direção ao Oceano Atlântico Sul. Ao atingir a costa sudeste do Brasil, esse escoamento de baixos níveis converge no Atlântico Sul, em aproximadamente 20°S - 45°W, com o ramo (carregado de umidade das águas do Atlântico Sul) da circulação anti-horária da ASAS e também com um acentuado sistema frontal que está avançando o Brasil e que se encontra próximo a Santa Catarina.

Essa Zona de Convergência formada no Atlântico Sul, dá suporte para o corredor de umidade formado desde a região Amazônica até as proximidades da Bacia do Prata, pois a ASAS carrega umidade proveniente do Oceano Atlântico Sul para toda a costa leste brasileira, além de que o sistema frontal, que está seguindo em direção ao sudeste brasileiro, carrega instabilidades em sua trajetória.

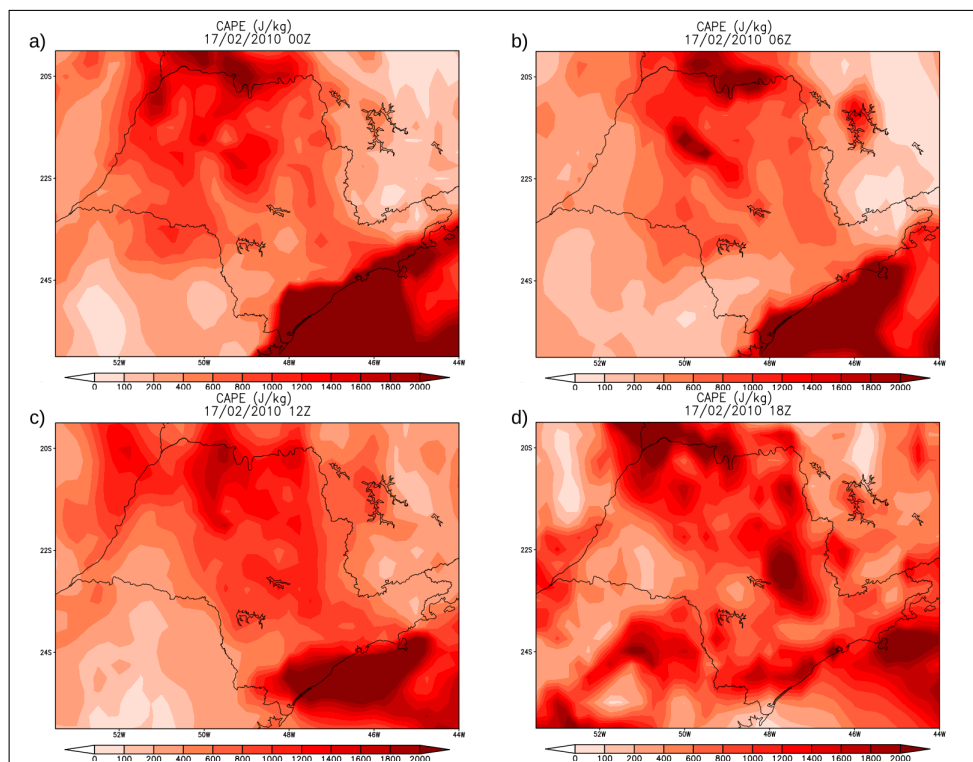


Figura 19 – (a), (b), (c) e (d) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) em (J kg^{-1}), para o dia 17/02/2010, nos respectivos horários 00, 06, 12 e 18Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

A estação A745, situada na ilha da Moela, encontra-se em aproximadamente $24,1^\circ \text{S}$ - $46,3^\circ \text{W}$, ou seja, em uma ilha na área litorânea do estado de SP, onde o CAPE se encontra elevado o dia todo nessa região, com valores acima de 2000 J kg^{-1} nesta localidade, nos primeiros três horários sinóticos. Nesse dia, houve acumulados horários registrados de 28,0 mm às 20 UTC e 30,2 mm às 22 UTC, entretanto o maior de todos foi de 44,2 mm, que ocorreu na precipitação das 23 UTC até 00 UTC do dia 18/02/2010. Sendo assim, observa-se uma redução no valor do CAPE às 18Z na região litorânea do estado de SP, mas mesmo com essa redução, os valores permaneceram acima de 2000 J kg^{-1} nas redondezas da estação A745.

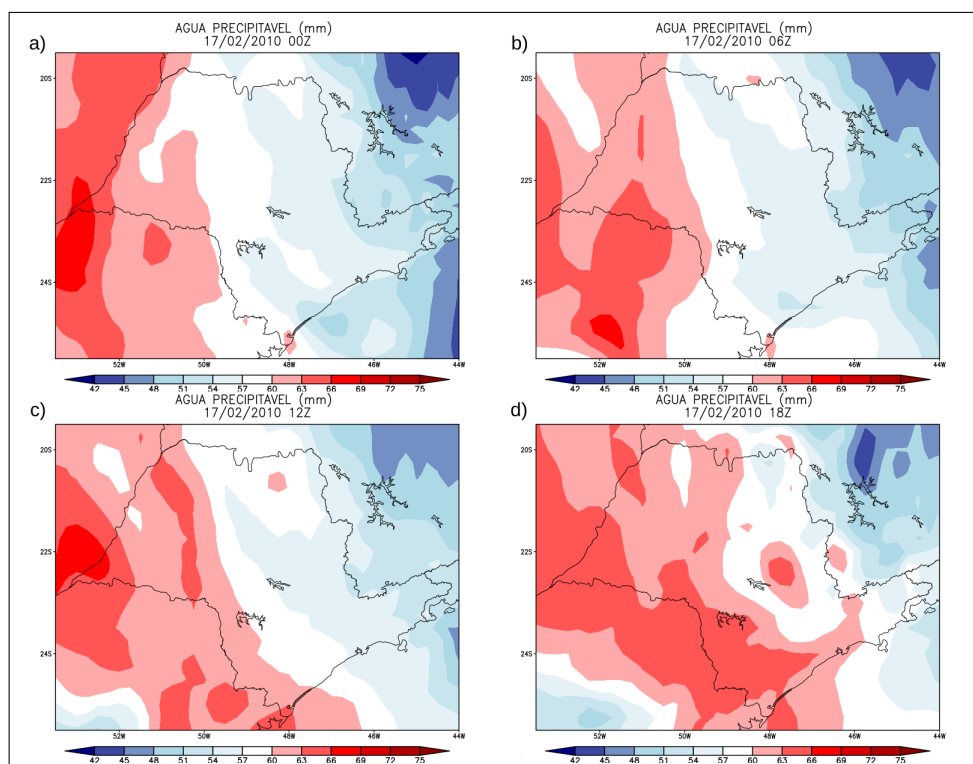


Figura 20 – (a), (b), (c) e (d) Água precipitável na coluna de ar atmosférico em milímetros (mm), para o dia 17/02/2010, nos respectivos horários sinóticos 00, 06, 12 e 18Z. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 20a,b,c, mostra que os maiores valores de água precipitável na coluna da camada se encontram a oeste, noroeste e parte da região sul do estado de São Paulo, com valores acima de 60 mm. Só a partir das 18Z (Figura 20d), horário sinótico que antecede a ocorrência do maior acumulado diário, que os valores de água precipitável no estado de São Paulo passam a aumentar também em maior parte da região sul, parte do sudeste, com um máximo isolado (com valores de 60 - 65 mm) em torno de 22° S - 48° W.

Para a região da estação A745, no horário que antecede o maior valor de precipitação horária, encontra-se com valores de 60 - 63 mm de água precipitável na coluna atmosférica.

Mesmo já obtendo alto valor de CAPE e água precipitável na coluna de ar atmosférico, na hora que antecede o maior acumulado de precipitação em uma hora, averiguou como que se comportou a magnitude da diferença vetorial do vento em 850 -500 hPa.

Na Tabela 6, encontram-se os maiores valores obtidos na plotagem das variáveis dinâmicas e termodinâmicas, com grade de $0,5^{\circ}$ da estação, onde foi registrado os maiores acumulados horários de precipitação, dos dias que mais estavam correlacionados com a CP4, dentre os 28 casos que se enquadram com precipitação iguais ou

superiores ao percentil 99%.

Tabela 6 – Eventos de precipitação extrema correlacionados com a CP4.

Data	Localização da Estação	Pmáx. diária (mm dia ⁻¹)	Maior acumulado horário de precipitação (mm h ⁻¹)	Água Precipitável (mm)	CAPE (J kg ⁻¹)	Magnitude da diferença vetorial do vento 850-500 hPa (m s ⁻¹)
*17/02/2010	Moela	136,2	44,0	63	2535	8
17/12/2012	Valparaíso	123,6	65,0	61	1774	14
05/01/2019	Rancharia	144,0	57,0	68	1833	7

(*)Dia mais correlacionado com a CP4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dias mais correlacionados com a CP4, em uma grade de 0,5° grau de cada estação na hora sinótica mais próxima do maior acumulado de precipitação, registrou maiores valores de água precipitável apenas acima de 61 mm, com altos valores de CAPE (acima de 1774 J kg⁻¹), para todos os dias e com valores de magnitude da diferença vetorial do vento entre as camadas de 850 e 500 hPa de 7 a 14 m s⁻¹.

Com base nos dados adquiridos na Tabela 6, essas precipitações máximas ocorridas em uma hora podem ter sido causadas principalmente por células unicelulares, devido a altos valores de CAPE.

5 Conclusão

De acordo com os dados da rede de estações automáticas do INMET, foram selecionados casos extremos de precipitação diária que excederam o percentil de 99%, desde 01/01/2010 até 31/12/2019, no estado de São Paulo. Esses eventos ocorreram em dias que o acumulado de precipitação entre 00 e 24 UTC atingiu pelo menos 119,2 mm dia⁻¹, totalizando assim, em 28 eventos extremos de precipitação nesse período de estudo.

Com esses casos de precipitação extrema, realizou-se a Análise de Componentes Principais com uma matriz no Modo-T para a pressão ao nível médio do mar (PNMM), com o intuito de se encontrar os padrões sinóticos associados a ocorrência de eventos de precipitação sobre o estado de São Paulo. Através desta análise, encontrou-se oito padrões sinóticos de PNMM, entretanto, neste trabalho só quatro os primeiros padrões foram analisados, pois a variância acumulada dessas quatro componentes principais já explicaram 74% do conjunto de casos, ou seja, essas quatro componentes foram capazes de englobar como se comportava a PNMM para maior parte dos casos de precipitação extrema. Além disso, averiguou-se na hora sinótica mais próxima do maior acumulado do dia que mais se correlacionou com cada CP, como se comportaram os valores de CAPE, água precipitável e magnitude da diferença vetorial do vento entre 850 - 500 hPa. Esta análise foi realizada a 0,5° (lat x lon) da estação que registrou esse maior acumulado horário.

Os resultados obtidos através da metodologia utilizada, foi de quatro padrões mais comuns que abrangem os dias de eventos extremos de precipitação, de acordo com os parâmetros utilizados. Dentre os 28 casos, 22 deles se encontram dentro da estação de verão, dois se enquadram dentro do outono e quatro casos estão presentes dentro da primavera.

A primeira componente principal, com 22,9% da variância explicada, foi caracterizada por um sistema frontal estacionário localizado sobre o estado de São Paulo, com uma circulação do oceano em direção ao continente, favorecendo o aumento de umidade na região de estudo. Os valores de CAPE, água precipitável e magnitude da diferença vetorial do vento (850 -500 hPa) para a hora sinótica anterior ao maior acumulado de precipitação que ocorreu no dia mais correlacionado com essa primeira CP, foram de 213 J kg⁻¹, 54 mm e 11 m s⁻¹, respectivamente.

Já a segunda componente principal apresentou 20,3% de variância explicada, associada a uma de Zona de Convergência, um padrão muito similar a Zona de Convergência do Atlântico sul (ZCAS), apesar de não poder se confirmar esse padrão,

pois encontrou-se o padrão para o dia do evento e não para uma sequência de dias. O dia que mais se correlacionou com está CP, apresentou valores como 366 J kg^{-1} de CAPE, 72 mm de água precipitável e 13 m s^{-1} de magnitude da diferença vetorial do vento na camada observada.

Para a terceira componente principal, obteve-se um padrão de baixas pressões a leste da Cordilheira dos Andes, juntamente com a circulação anticiclônica da ASAS, que associadas favorecem a confluência de umidade sobre o estado de São Paulo. O dia em que o padrão estava mais semelhante a este padrão, horas antes do maior acumulado horário, registrou-se CAPE em torno de 1131 J kg^{-1} , 59 mm de água precipitável e 15 m s^{-1} de magnitude da diferença vetorial do vento.

Por fim, o padrão encontrado pela quarta componente principal, que explica 11,6% dos casos, está associado a um escoamento que traz umidade da Amazônia diretamente para o estado de SP, com a aproximação de uma frente fria desde o sul do estado de São Paulo. Próximo a estação do maior registro diário, o CAPE foi de 2535 J kg^{-1} , a água precipitável foi de 63 mm e a magnitude da diferença vetorial do vento entre 850 - 500 hPa foi de 8 m s^{-1} , horas antes do maior acumulado horário para o dia mais correlacionado com a CP4.

Para trabalhos futuros é necessário confrontar os valores de CAPE e de cisalhamento vertical do vento encontrados neste trabalho, com os dados dos radares do estado de São Paulo, a fim de determinar o modo convectivo (unicelular, multicelular, supercelular) associado a estes eventos extremos de precipitação.

Referências

- ALEXANDER, L. V. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in ipcc assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes*, Elsevier, v. 11, p. 4–16, 2016.
- ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; TANK, A. K.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 111, n. D5, 2006.
- ALVES, L. M.; MARENGO, J. A.; FU, R.; BOMBARDI, R. J. Sensitivity of amazon regional climate to deforestation. *American Journal of Climate Change*, Scientific Research Publishing, v. 6, n. 1, p. 75–98, 2017.
- BONNER, W. D. Climatology of the low level jet. *Monthly Weather Review*, v. 96, n. 12, p. 833–850, 1968.
- BRITO, A. L.; PAIX, J. A.; YOSHIDA, M. C. et al. Extreme rainfall events over the amazon basin produce significant quantities of rain relative to the rainfall climatology. *Atmospheric and Climate Sciences*, Scientific Research Publishing, v. 2014, p. 179–191, 2014.
- CARVALHO, L. M.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern south america and large-scale convective patterns in the south atlantic convergence zone. *Journal of Climate*, American Meteorological Society, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.
- CARVALHO, L. M.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The south atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.
- CATTELL, R. B. Fixing the number of factors: The most practicable psychometric procedures. In: *The Scientific Use of Factor Analysis in Behavioral and Life Sciences*. [S.l.]: Springer, 1978. p. 72–91.
- COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A. Surface pressure patterns during the year over southern south america. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 17, n. 6, p. 635–653, 1997.
- COSTA, M. d. S. Padrão atmosférico dos eventos de precipitação fraca e intensa no semiárido do nordeste do brasil. Brasil, 2018.
- DIAL, G. L.; RACY, J. P.; THOMPSON, R. L. Short-term convective mode evolution along synoptic boundaries. *Weather and forecasting*, v. 25, n. 5, p. 1430–1446, 2010.
- DIAS, M. A. F. da S. Eventos climáticos extremos. *Revista usp*, n. 103, p. 33–40, 2014.
- DUFEK, A.; AMBRIZZI, T. Precipitation variability in são paulo state, brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer, v. 93, n. 3, p. 167–178, 2008.

- ESCOBAR, G. C. J.; VAZ, J. C. M.; REBOITA, M. S. Surface atmospheric circulation associated with “friagens” in central-west brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, n. 1, p. 241–254, 2019.
- GIORGI, F.; COPPOLA, E.; RAFFAELE, F.; DIRO, G. T.; FUENTES-FRANCO, R.; GIULIANI, G.; MAMGAIN, A.; LLOPART, M. P.; MARIOTTI, L.; TORMA, C. Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the crema ensemble projections. *Climatic Change*, Springer, v. 125, n. 1, p. 39–51, 2014.
- GREEN, P. E. Analzing multivariate data the dryden press. *Hinsdale, Illinois*, 1978.
- HARMAN, H. H. *Modern factor analysis*. [S.l.]: University of Chicago press, 1976.
- HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D. et al. The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.
- HOUZE, A. R. *Cloud dynamics*. 1. ed. San Diego: Academic press, 1993. v. 53. 573 p.
- IPCC, C. et al. *The physical science basis*. [S.l.]: Cambridge Univ. Press, 2013.
- JOHNS, R. H.; DOSWELL III, C. A. Severe local storms forecasting. *Wea. Forecasting*, v. 7, n. 4, p. 588–612, 1992.
- JOHNSON, R. H.; MAPES, B. E. Mesoscale processes and severe convective weather. In: *Severe convective storms*. [S.l.]: Springer, 2001. p. 71–122.
- KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz) part i: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, Meteorological Society of Japan, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992.
- LENTERS, J.; COOK, K. Summertime precipitation variability over south america: Role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review*, v. 127, n. 3, p. 409–431, 1997.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em são paulo em 2014: seca e desmatamento. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, v. 19, n. 3, p. 485–494, 2015.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the metropolitan area of são paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Wiley Online Library, v. 1472, n. 1, p. 5–20, 2020.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the amazon region. *Geophysical research letters*, Wiley Online Library, v. 38, n. 12, 2011.
- MARKOWSKI, P.; RICHARDSON, Y. *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 2.
- MATTOS, E. V. Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas. *Mestrado em meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos*, p. 243, 2009.

- MATTOS, E. V.; REBOITA, M. S.; LLOPART, M. P.; ENORÉ, D. P. Análise sinótica e caracterização física de uma tempestade intensa ocorrida na região de bauru-sp. *Anuario do Instituto de Geociencias*, v. 43, n. 1, p. 85–106, 2020.
- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A. et al. Global climate projections. chapter 10. p. 847–940, 2007.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. d.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. *Revista brasileira de meteorologia*, SciELO Brasil, v. 25, p. 185–204, 2010.
- REGAZZI, A. J. Análise multivariada, notas de aula inf 766. *Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa*, v. 2, 2000.
- ROCHA, A.; GANDU, A. W. South atlantic convergence zone. *Climanálise especial*, CPTEC/ INPE, p. 140–142, 1996.
- RODRIGUES, H. P. et al. Zona de convergência do atlântico sul: um estudo observacional e numérico. Universidade Federal de Campina Grande, 2012.
- SANTOS, J. G. M. d.; CAMPOS, C. R. J. d.; LIMA, K. C. Análise de jatos de baixos níveis associados aum sistema convectivo de mesoescala na américa do sul: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 26, n. 4, p. 451–468, 2008.
- SILLMANN, J.; KHARIN, V.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the cmip5 multimodel ensemble: Part 1. model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 118, n. 4, p. 1716–1733, 2013.
- TRAPP, R. J. *Mesoscale-convective processes in the atmosphere*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013. 346 p.
- VARELLA, C. A. A. Análise de componentes principais. *Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro*, p. 38, 2008.
- VIDAL, L. *Convección extrema sobre Sudamérica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografía en la iniciación*. Tese (Doutorado) — Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2014.
- ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M.; LIEBMANN, B.; DIAS, M. A. S. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of brazil. *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.