Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

ANÁLISE SINÓTICA E CLIMATOLÓGICA DO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDO EM MAIO DE 2017 NO CENTRO-OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

GOZZO, Luiz Felippe – luiz.gozzo@unesp.br
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / UNESP - Bauru

VERDELHO, Fernanda Ferreira - fernandaverdelho@gmail.com
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / UNESP – Bauru

CUSTÓDIO, Maria de Souza - m.custodio@unesp.br
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / UNESP - Bauru

Submetido em: 30/03/2020
Aceito para publicação em: 17/11/2020
Publicado em: 01/12/2020
DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.72560

RESUMO: O centro-oeste do estado de São Paulo é um relevante polo agrícola e industrial do Brasil, além de concentrar importantes cidades do estado. Eventos extremos de precipitação trazem, portanto, graves consequências econômicas e sociais para esta região, e a previsibilidade de tais eventos é uma questão de grande importância e complexidade nos subtrópicos. O objetivo deste trabalho é investigar fatores de escalas sinótica e global que resultaram em chuvas extremas sobre o centro-oeste paulista no mês de maio de 2017, em um período do ano em que climatologicamente as chuvas já estão reduzidas pela aproximação da estação seca. A presença de um anticiclone barotrópico anômalo sobre o Atlântico Sul, devido à propagação de um trem de ondas de Rossby desde os Oceanos Índico e Pacífico até o Oceano Atlântico, acarretou convergência de umidade sobre o Brasil Central durante o mês de maio de 2017, criando um ambiente propício para chuvas volumosas. Esta condição climática, em conjunto com a ocorrência de padrões sinóticos (Jatos de Baixos Níveis, passagem de cavados na média troposfera, divergência em altos níveis) criaram a condição para os extremos de precipitação observados. A circulação atmosférica em escala global foi modulada principalmente por anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Índico (Dipolo do Índico) e na região do Niño 1+2. A importância relativa destas duas regiões foi reforçada por uma análise de regressão múltipla mostrando que, climatologicamente, 42% da variabilidade da precipitação no mês de maio em Bauru (cidade localizada na região central do estado) pode ser explicada por condições de temperatura da superfície do mar nestas áreas. Tais resultados podem contribuir para melhorar a previsibilidade das chuvas extremas no centro-oeste de São Paulo durante o outono, associando-as a padrões climáticos bem estabelecidos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise sinótica, Climatologia Dinâmica, extremos de precipitação, teleconexões.

SYNOTIC AND CLIMATOLOGICAL ANALYSIS OF THE EXTREME PRECIPITATION OCCURRED IN MAY 2017 IN THE WEST CENTER OF THE STATE OF SÃO PAULO

ABSTRACT: The central-western sector of the Sao Paulo state is a major industrial and agricultural center in Brazil, and also is a region of important and well-developed cities. Extreme rainfall events can cause serious social and economic consequencies to this region, and the predictability of such events is a question of great importance and complexity in the subtropics. A strong positive precipitation anomaly occurred over the whole central-western Sao Paulo in May 2017, during a period when the rainfall is normally reduced by the onset of the dry season. The aim of this work is to investigate synoptic scale and climatological factors that resulted in this episode of extreme precipitation. The presence of an anomalous barotropic anticyclone over the South

Atlantic Ocean, due to the propagation of Rossby wave trains from the Indian and Pacific Ocean basins, caused moisture convergence in Central South America during May 2017, creating a favorable environment for heavy rainfall. This climatic condition, along with the occurrence of synoptic patterns that cause instability and vertical motions (low-level jet, mid-tropospheric troughs, upper-level divergence) led to the observed extreme precipitation. The large-scale atmospheric circulation was modulated mainly by sea surface temperatures in the Indian Ocean and in the Niño 1+2 region. The relative importance of both regions was reinforced by a multiple regression analysis showing that according to the climatology, 42% of the precipitation variability in May over Bauru (a city situated in the central-western Sao Paulo) can be explained by sea surface temperature in these oceanic regions. The results presented here can contribute to improve the predictability of extreme precipitation events in central-western Sao Paulo during autumn, linking such events to well documented large-scale climate patterns.

KEYWORDS: Synoptic analysis, Dynamic Climatology, Precipitation extremes, teleconnections.

1. INTRODUÇÃO

O clima do estado de São Paulo (SP), na região sudeste do Brasil, é determinado pelo sistema de monção da América do Sul (ZHOU e LAU, 1998; MARENGO et al., 2012), apresentando uma estação chuvosa durante o verão austral (Dezembro a Fevereiro) e uma estação seca no inverno (Junho a Agosto). Ao longo da costa leste do estado, o volume de precipitação é mais elevado (KELLER-FILHO et al., 2005), devido à frequente atuação de sistemas frontais, ciclones extratropicais costeiros e circulação de brisa (REBOITA et al., 2012). Já no centro-oeste de SP, a maior parte da precipitação está associada à circulação de monção. Ao longo da fase ativa da monção, é frequente o estabelecimento da circulação do Jato de Baixos Níveis (JBN) Sul-Americano (MARENGO et al., 2004) que transporta umidade desde o Oceano Atlântico Tropical e a Floresta Amazônica até o Sul/Sudeste do país, alimentando a convecção. Durante a estação chuvosa pode-se configurar a Zona de Convergência do Atlântico Sul (KODAMA, 1992; SILVA et al., 2019), provocando longos períodos de precipitação. Na estação seca, a chuva do centro-oeste paulista decorre principalmente de instabilidades associadas a frentes frias que, embora menos frequentes do que no leste do estado (CAVALCANTI et al., 2009), podem provocar grandes acumulados.

Eventos intensos ou extremos de precipitação configuram grave problema em todo o estado de SP, principalmente por seu impacto sobre os grandes centros urbanos. Com volumes mais elevados de chuva, a faixa leste do estado registra maior número de desastres naturais como inundações, alagamentos e vendavais; porém, muitas cidades do centro-oeste paulista também sofrem com estes transtornos (GIMENEZ, 2017). O impacto de chuvas extremas sobre o ambiente urbano e o número de pessoas atingidas em cidades do interior paulista vem aumentando nas últimas décadas (PINHEIRO, 2013; LIMA e AMORIM, 2015). Além do impacto social, chuvas intensas também são prejudiciais às atividades agrícolas. Sendo o estado de SP responsável por 15,1% da produção agrícola de todo o país (IBGE, 2017), estes prejuízos tornam-se ainda mais graves.

Eventos intensos/extremos de precipitação em SP estão frequentemente ligados a padrões sinóticos que aumentam a instabilidade, como passagem de frentes frias e intensificação do JBN, ocorrendo em períodos em que oscilações climáticas de grande escala estão em uma fase que já favorece o aumento da

precipitação na região (CAVALCANTI, 2012). O principal modo de variabilidade do clima em grande escala, o El Niño-Oscilação Sul – ENSO (NEELIN et al., 1998; DAI e WIGLEY, 2000), não apresenta uma relação bem definida com estes extremos pois o estado de SP se encontra em uma zona de transição entre regimes tropical e extratropical (COELHO et al., 2002; MUZA et al., 2009). Porém, diferentes regiões de aquecimento do Pacífico provocam diferentes contribuições para o estado. Silva e Silva (2015) destacam que os mais altos valores de correlação entre a temperatura da superfície do mar (TSM) e a chuva no sudeste do Brasil ocorrem para a região do Niño 1+2. Em relação ao Oceano Atlântico, o Dipolo do Atlântico Sul – DAS (NNAMCHI et al., 2011) em fase negativa durante a estação chuvosa provoca anomalias positivas de precipitação sobre todo o Sudeste e até o Centro-Oeste do Brasil, devido à migração para norte dos ciclones extratropicais e o favorecimento da ocorrência de ZCAS (BOMBARDI et al., 2014). O dipolo de TSM que ocorre no oceano Índico, conhecido como Dipolo do Oceano Índico/IOD (SAJI et al., 1999) também pode influenciar o regime de chuvas no sudeste da América do Sul, por mecanismo de teleconexão. A fase positiva do IOD durante a primavera austral (pico da oscilação) excita um trem de ondas de Rossby que se propaga até a América do Sul, intensificando a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e reduzindo as chuvas sobre o Sudeste do Brasil (CHAN et al., 2008). Em uma análise em escala mensal para o período 1951-2004, Taschetto e Ambrizzi (2012) apresentam uma correlação positiva significativa entre a TSM de toda a bacia do Índico e chuvas na região centro-oeste de SP, especialmente nos meses de Novembro, Abril e Maio.

Observa-se tendência de aumento do número de casos e da intensidade de eventos extremos de precipitação sobre o leste de SP desde a metade do século passado, especialmente sobre a capital, São Paulo (MARENGO et al., 2013; RAIMUNDO et al., 2014; LIMA et al., 2018), e existem numerosos trabalhos que investigam a associação entre esses eventos e padrões sinóticos e climáticos para o leste do estado (RODRIGUEZ et al., 2010; DIAS et al., 2013; VEMADO E PEREIRA-FILHO, 2016; BRASILIENSE et al., 2018; CALADO et al., 2019). Porém, até onde sabemos, há um número reduzido destes estudos com foco no centro-oeste de SP, região onde também a frequência e o volume de chuvas intensas vêm aumentando de forma significativa nas últimas décadas (HAYLOCK et al., 2006; DUFEK e AMBRIZZI, 2008, MARENGO, 2010, ZILLI et al. 2017).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é analisar o acumulado elevado de precipitação no centro-oeste paulista no mês de maio de 2017, relacionando-o às condições sinóticas e de escala global registradas no período. O estudo busca melhorar a compreensão de episódios intensos/extremos de chuva na região, que apresenta um número reduzido de estudos e basicamente focados na estação chuvosa (verão austral). O mês de maio já se configura na estação seca, apresentando tipicamente baixos acumulados de chuva (LIEBMANN et al., 2004), portanto anomalias positivas intensas são mais inesperadas e com maior potencial de prejuízo nesta época.

A região de estudo apresenta cobertura de estações meteorológicas bastante irregular e esparsa (TEIXEIRA e SATYAMURTI, 2011; GOZZO et al., 2019). Assim, para determinar os dias de maior precipitação, foram utilizados dados consistentes da cidade de Bauru. A precipitação acumulada em maio de 2017 na estação meteorológica do Centro de Meteorologia de Bauru

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

(IPMET)/UNESP foi de 218,7 mm (240% da média mensal), sendo o mês de maio mais chuvoso desde 1987, e o terceiro mais chuvoso de todo o período de medições de 39 anos (1981-2019).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Dados de precipitação foram obtidos na estação meteorológica do IPMET/UNESP localizado na cidade de Bauru – SP (22.35°S, 49.02°W), como médias mensais para o período de 1981 a 2019, e como dados horários entre 01 e 31 de maio de 2017. Os dados não apresentam falhas durante o período analisado. A posição aproximada da estação no estado de SP, assim como a área do centro-oeste paulista, estão indicados na Figura 1, sobrepostos aos dados de anomalia de precipitação para o mês de maio de 2017, fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC–INPE).

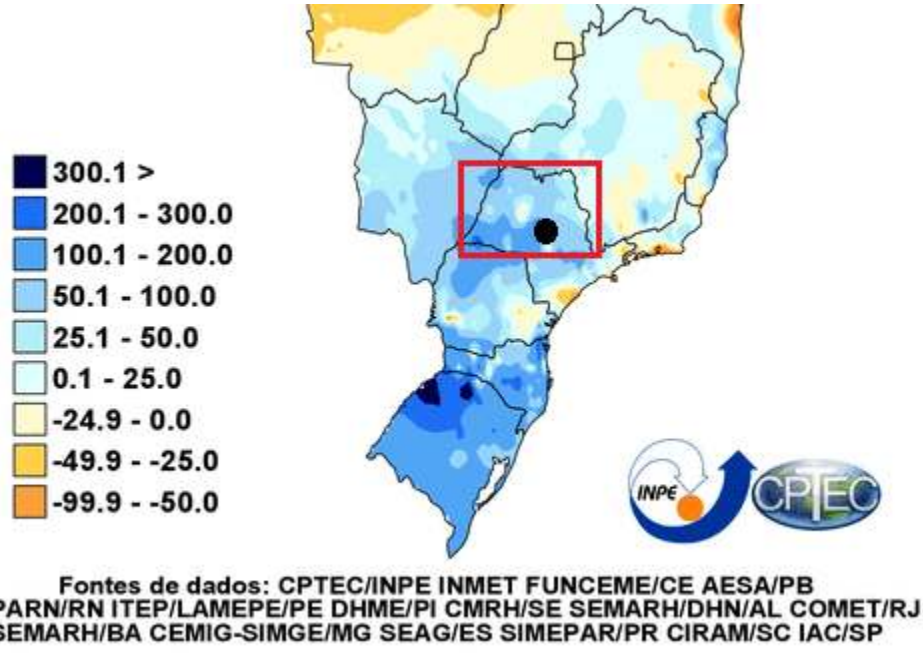

Figura 1 – Anomalia de precipitação do mês de maio de 2017 em relação à média (1981-2010), em mm. O círculo preto indica a posição aproximada da estação meteorológica do IPMET/UNESP (Bauru), e o retângulo vermelho destaca a região centro-oeste do estado de São Paulo. Mapa adaptado do CPTEC-INPE.

Para as análises sinóticas, foram utilizados dados de vento horizontal e vertical, umidade específica, altura geopotencial e TSM da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – ECMWF (HERSBACH et al., 2019), com resolução horizontal de 0,25° x 0,25° de latitude e longitude, nos quatro horários sinóticos (0000, 0600, 1200 e 1800UTC). Estão apresentados neste trabalho campos relativos aos dias de maior precipitação acumulada em 24h na estação de Bauru: 05/05/2017 (53,4 mm) e 19/05/2017 (64,5 mm). Estes acumulados correspondem a extremos em escala diária para a localidade, sendo eventos raros - têm frequência relativa de ocorrência inferior a 1% no período de 2001 a 2017 (MACHADO et al., 2019).

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Na análise climatológica, estão apresentadas as anomalias mensais de maio de 2017 (em relação à média dos meses de maio entre 1981-2019) para as variáveis TSM, vento horizontal, umidade específica e altura geopotencial. Além disso, foram calculadas correlações lineares entre a anomalia de precipitação na estação do IPMET no mês de maio (em relação à média 1981-2019) e o valor de índices climáticos. Os índices do Niño 1+2, Niño 3.4 e IOD foram obtidos a partir das séries históricas da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), e o índice DAS, definido por Morioka et al. (2011) como a diferença entre as anomalias mensais de TSM sobre o Atlântico Sudoeste (30°W-10°W; 40°S-30°S) e Nordeste (20°W-0°; 25°S-15°S), foi calculado a partir dos dados de TSM da ERA5. Meses com o índice DAS positivo (negativo) indica anomalias positivas (negativas) de TSM no Atlântico Sudoeste, e anomalias negativas (positivas) no Atlântico Nordeste.

Os efeitos separados de cada padrão de variabilidade climática sobre a precipitação na região de estudo foram calculados através de correlações parciais e da inclinação parcial da reta de regressão múltipla (HEALEY, 2014). A técnica de correlações parciais é uma quantificação da relação linear entre duas variáveis contínuas, enquanto outra ou outras variáveis associadas ao fenômeno são controladas. Já a inclinação parcial da reta de regressão múltipla fornece a quantidade de mudança de uma variável de acordo com a quantidade de mudança de uma variável preditora, após todas as outras variáveis preditoras serem mantidas constantes. Foram calculados coeficientes de inclinação padronizados pelo desvio-padrão, para que possam ser diretamente comparáveis, e também o coeficiente de determinação múltiplo R^2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. ANÁLISE SINÓTICA

3.1.1. 05 DE MAIO DE 2017

No dia 05 de maio de 2017, 0000UTC, um cavado em 250hPa atua sobre a região Sul e sobre o sul das regiões Sudeste e Centro-Oeste (Fig. 2a). O Jato Subtropical (JST), com velocidade máxima de 35 m s^{-1}, está posicionado a leste do cavado, em uma configuração que favorece o lento deslocamento da ondulação. Este padrão em altos níveis se mantém ao longo de todo o dia. O cavado, bem como uma crista a oeste (com eixo próximo de 70°W), também são evidentes no campo de altura geopotencial em 500 hPa (Fig. 2b). Em 850 hPa (Fig. 2c), a circulação da ASAS advecta ar úmido em direção à costa do Nordeste e norte do Sudeste, sofrendo uma curvatura para sul sobre o estado de São Paulo devido ao desenvolvimento de uma circulação anticiclônica entre o nordeste da Argentina e a região Sul. Valores de umidade específica entre 0.9 e 1.5 g kg^{-1} são observados sobre o centro-oeste de SP.

Doze horas depois, o eixo do cavado em altos níveis encontra-se sobre os estados da região Sul e do MS, circundado pelo JST com velocidades máximas entre 30 e 40 m s^{-1} (Fig. 2d). Nas isolinhas de altura geopotencial em 500 hPa (Fig. 2e), observa-se a configuração da crista a oeste (eixo entre as longitudes de 70 e 65°W) e perturbações de onda curta embebidos no escoamento do cavado, desde o Mato Grosso do Sul (MS) até o oceano Atlântico (entre 20 e 25°S); estas perturbações possivelmente se originam da presença da corrente de jato em altos níveis na região. Também verifica-se movimento ascendente

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

principalmente sobre o leste de SP, sul do MS e região central do Paraná (PR). A formação de um sistema de alta pressão em baixos níveis centrada próxima ao Uruguai (Fig. 2f), em resposta à crista de médios e altos níveis, mantém a convergência de massa e umidade sobre SP ao longo do dia.

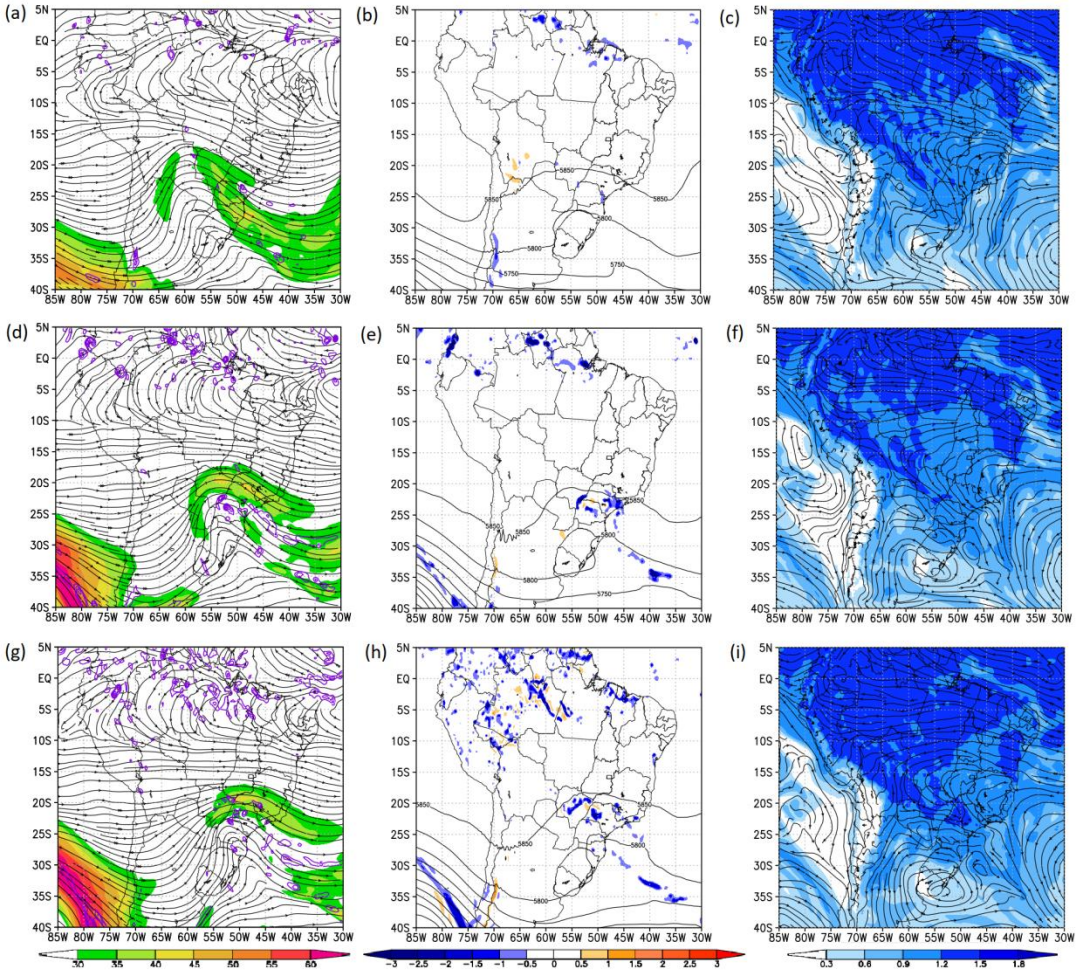

Figura 2 – Campos sinóticos do dia 05 de maio de 2017, a partir da reanálise ERA5. Vento horizontal (linhas de corrente), velocidade do vento horizontal (sombreado, em m s^{-1}) e regiões de divergência horizontal acima de $+5.10^{-5}$ s^{-1} (contornos roxos) em 250 hPa para (a) 0000UTC, (d) 1200 UTC e (g) 1800UTC; altura geopotencial (m) e ω (sombreado, em Pa s^{-1}) em 500 hPa, para (b) 0000UTC, (e) 1200 UTC e (h) 1800UTC; vento horizontal (linhas de corrente) e umidade específica (sombreado, em g kg^{-1}) em 850 hPa para (c) 0000UTC, (f) 1200 UTC e (i) 1800UTC.

Às 1800UTC do dia 05 de maio, o cavado em 250 hPa, com seu eixo posicionado agora próximo da costa da região Sul, segue atuando o sul das regiões Sudeste e Centro-Oeste. O escoamento apresenta forte divergência de massa em altos níveis sobre o centro-oeste de SP, e a presença do JST contribui para instabilizar a atmosfera na região (Fig. 2g). Em 850 hPa, intensifica-se a convergência de massa entre a circulação da ASAS e da alta transiente em 35°S/55°W (Fig. 2i), que associada à divergência em altos níveis provoca forte movimento ascendente sobre o centro-oeste paulista (Fig. 2h). Os movimentos verticais do ar bastante úmido (umidade específica entre 1.2 e 1.5 g kg^{-1} sobre

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

todo o oeste de SP) resultaram nas chuvas intensas registradas na região. A figura 3 mostra o desenvolvimento de grandes nuvens convectivas, com temperaturas de topo em torno de -60°C, na região central de SP, entre 1800 e 2100UTC, nas imagens do canal infravermelho realçado do satélite GOES-16. A massa de ar seco associada à alta transiente atua sobre Uruguai e Rio Grande do Sul. Pode-se inferir também a presença da corrente de jato em altos níveis com uma curvatura ciclônica, associada ao cavado, a partir da orientação da nebulosidade sobre Mato Grosso do Sul, SP, Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais.

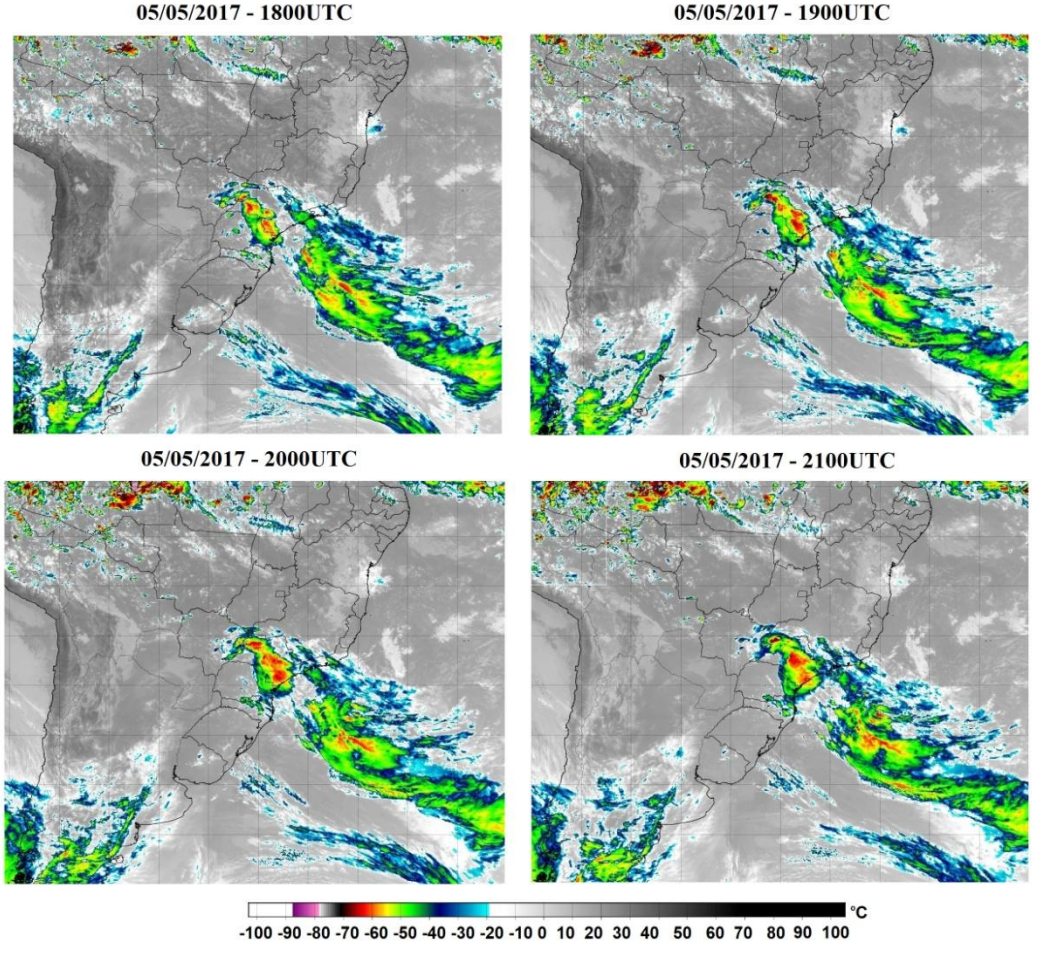

Figura 3 – Imagens do canal infravermelho (10,3 μm) realçado do satélite GOES-16 para o dia 05 de maio de 2017 nos horários de 1800, 1900, 2000 e 2100UTC. Fonte: Acervo CPTEC-INPE.

3.1.2. 19 DE MAIO DE 2017

No dia 19 de maio de 2017 às 0000UTC, um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) está cruzando a Cordilheira dos Andes, posicionado em 35°S/70°W e contornado pelos Jatos Subtropical e Polar, com velocidades que chegam a 65 m s^{-1} (Fig. 4a). Sobre o estado de SP, o escoamento é relativamente zonal na alta e média troposfera, o que também é evidenciado

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

pelo campo de altura geopotencial em 500 hPa (Fig. 4b). O campo de ω em médios níveis mostra forte movimento ascendente entre o nordeste da Argentina, sul do Paraguai e Sul do Brasil (Fig. 4b), ocorrendo devido ao efeito combinado do VCAN e da convergência de massa em baixos níveis da troposfera (Fig. 4c). O campo de vento e umidade específica em 850 hPa também mostra escoamento de JBN que vem do Oceano Atlântico Tropical, desde a região equatorial, e passa pela região amazônica, transportando grandes quantidades de umidade em direção ao sul e sudeste do Brasil (Fig. 4c). Este padrão de transporte de umidade desde o Atlântico Tropical já não é mais tão frequente no mês de maio, sendo uma característica típica da primavera e verão, período no qual o sistema de monção da América do Sul está em sua fase ativa (MARENGO et al., 2012).

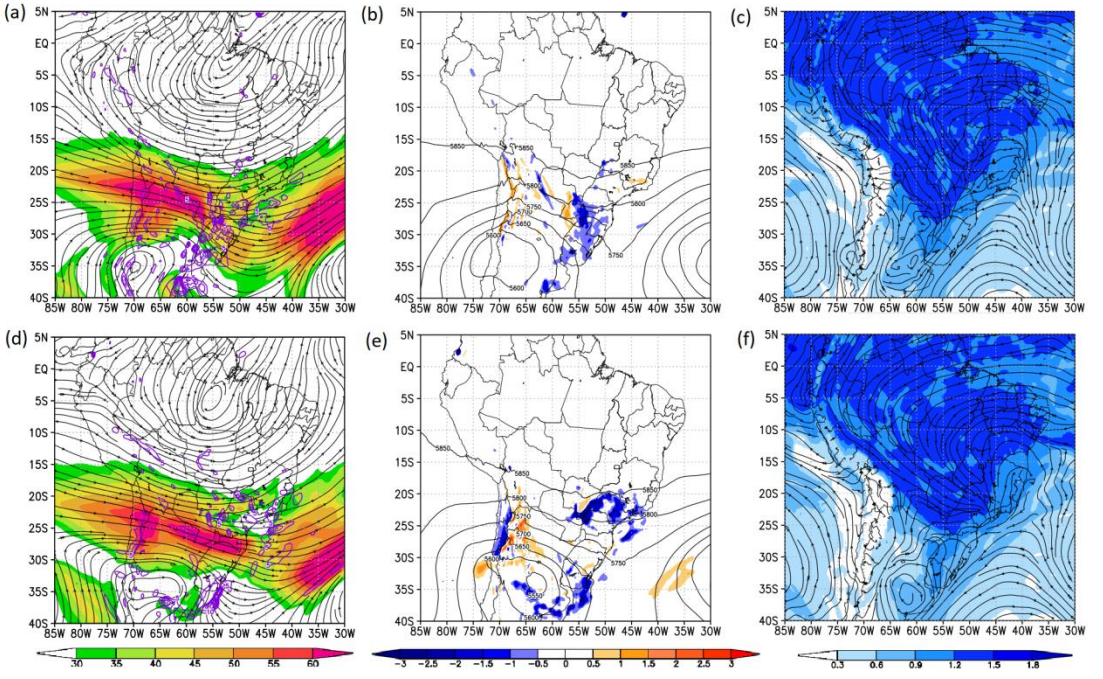

Figura 4 – Campos sinóticos do dia 19 de maio de 2017, a partir da reanálise ERA5. Vento horizontal (linhas de corrente), velocidade do vento horizontal (sombreado, em m s^{-1}) e regiões de divergência horizontal acima de $+5.10^{-5}$ s^{-1} (contornos roxos) em 250 hPa para (a) 0000UTC e (d) 1200 UTC; altura geopotencial (m) e ω (sombreado, em Pa s^{-1}) em 500 hPa, para (b) 0000UTC e (e) 1200 UTC; vento horizontal (linhas de corrente) e umidade específica (sombreado, em g kg^{-1}) em 850 hPa para (c) 0000UTC e (f) 1200 UTC.

Às 1200UTC do dia 19 de maio de 2017, horário pelas medições pluviométricas onde se deu o início da precipitação no município de Bauru, observa-se forte convergência de massa em baixos níveis sobre SP (Fig. 4f), resultando em intenso movimento ascendente (Fig. 4e). O escoamento associado a um sistema de baixa pressão em 850 hPa centrado em 35°S/60°W (Fig. 4f), originado a partir do VCAN em altos níveis (Fig. 4d), força a convergência de massa e de umidade a se posicionar e manter sobre SP, favorecendo a instabilidade na região. Em médios níveis da troposfera, o escoamento segue aproximadamente zonal sobre o estado, porém com perturbações de onda curta no campo de altura geopotencial (Fig. 4e). Em altos

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

níveis, a presença do jato de altos níveis e escoamento difluente sobre SP reforçam as instabilidades (Fig. 4d).

Nas imagens do satélite GOES16 para o dia 19 de maio, entre 1000UTC e 1615UTC (Fig. 5), pode-se observar claramente o rastro de nebulosidade associado ao JBN estendendo-se desde as proximidades do Acre até o interior de SP, bem como o padrão de nuvens associado ao sistema ciclônico induzido pelo VCAN na região central da Argentina. As nuvens convectivas sobre SP neste evento apresentaram grande desenvolvimento vertical, com temperaturas de topo próximas a -80°C.

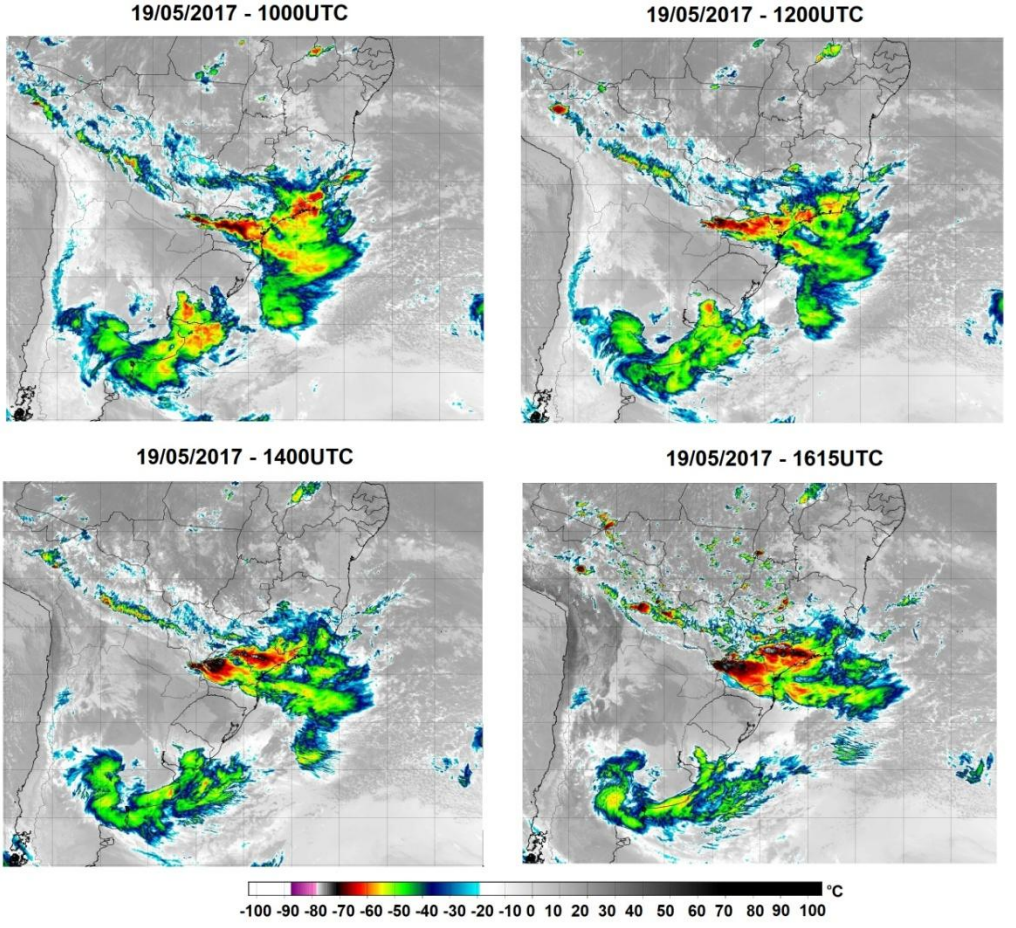

Figura 5 – Imagens do canal infravermelho (10,3 μm) realçado do satélite GOES-16 para o dia 19 de maio de 2017 nos horários de 1000, 1200, 1400 e 1615UTC. Fonte: Acervo CPTEC-INPE.

3.2. ANÁLISE EM ESCALA GLOBAL

O grande volume de chuvas registrado em maio de 2017 não foi resultado apenas dos padrões sinóticos descritos no item anterior, mas sim da ocorrência destes durante uma condição atmosférica de escala global e remota também favorável a precipitação acima da média. Esta condição surge a partir dos padrões de teleconexão, respostas da atmosfera às condições anômalas globais de TSM.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

As anomalias de TSM globais de maio de 2017, que sustentam os padrões de teleconexão atmosférica discutidos posteriormente, estão apresentadas na Figura 6. A região do Niño 3.4 apresenta-se neutra de acordo com os valores do *Oceanic Niño Index* (ONI); embora ocorram algumas áreas na bacia do Pacífico com anomalias superiores a 0,5°C, a média na área não passa de 0,4°C. De acordo com a serie temporal do índice ONI (NOAA), esta região manteve-se em neutralidade desde o trimestre Dezembro-Janeiro-Feveiro de 2016/2017 (quando saiu de uma situação de La Niña) até o trimestre Agosto-Setembro-Outubro de 2017 (entrando novamente em uma situação de La Niña). Na região do Niño 1+2, as anomalias estão positivas, mas também neutras segundo o índice da NOAA. Porém, o índice indicava anomalias positivas desde janeiro, com magnitudes até 0,92°C e 1,56°C em fevereiro e março de 2017. Sobre o Oceano Índico, anomalias negativas de TSM ocorrem na região leste, próximo à Austrália, e anomalias positivas estão presentes a leste e sudoeste da ilha de Madagascar, com magnitude chegando a +1,4°C, em um padrão característico da fase positiva do IOD. Na bacia do Atlântico Sul, as anomalias se assemelham à fase positiva do DAS, um padrão de grande escala que tende a inibir a precipitação no Sudeste do Brasil durante a estação chuvosa (BOMBARDI et al., 2014).

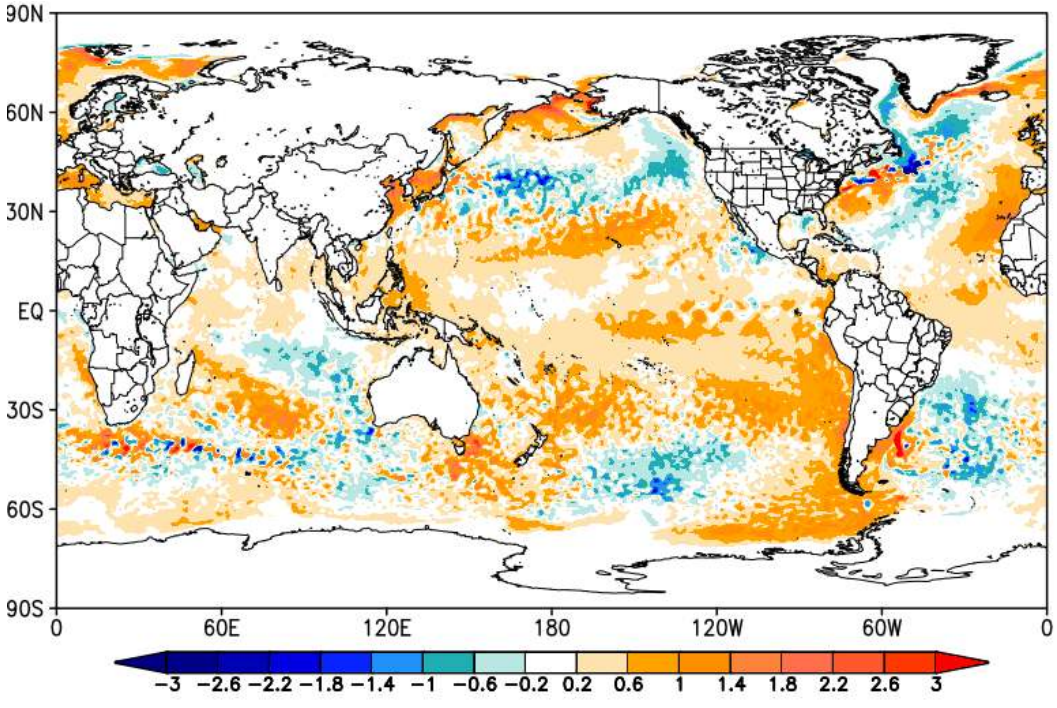

Figura 6 – Anomalia de TSM (em K) para o mês de maio de 2017, em relação à média de maio no período 1981-2019, a partir da reanálise ERA5.

Anomalias de vento horizontal em 250 hPa em maio de 2017 mostram um padrão de trem de onda, com uma sequência semi estacionária de circulações ciclônicas e anticiclônicas entre o sudoeste do oceano Pacífico e o sudoeste do oceano Atlântico (Fig. 7a). O ciclone anômalo centrado aproximadamente em 30°S-80°W intensifica o jato subtropical de altos níveis entre o norte da Argentina e o Sul do Brasil, induzindo abaixamento de pressão em superfície e desta forma favorecendo a formação do JBN na baixa

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

troposfera, como se verificou ao longo de alguns dias do mês. A sudeste deste ciclone, um anticiclone em 50°S-50°W gera um escoamento em direção à costa da América do Sul, na altura do Uruguai/Rio Grande do Sul. Tais circulações em altos níveis se estendem na vertical até a baixa troposfera. No nível de 500 hPa, o anticiclone em 50°S-50°W é identificado com uma forte anomalia positiva de altura geopotencial (Fig. 7b). A configuração das anomalias sugere que esta alta intensa pode ser o resultado da interferência construtiva entre dois trens de onda associados a duas diferentes teleconexões: ondas excitadas pelo aquecimento do oceano na região do Niño 1+2 (linha verde) intercepta ondas relacionadas ao Dipolo do Índico (linha roxa). Tais linhas na Fig. 7 não representam resultados de cálculos, e foram apenas acrescentadas ao mapa para sugerir a posição dos trens de ondas; ressalta-se, porém, que elas são qualitativamente semelhantes aos padrões de teleconexão apresentados por outros trabalhos para anomalias de temperatura próximas à região do Niño 1+2 (AMBRIZZI e HOSKINS, 1997) e para o Dipolo do Índico (SAJI e YAMAGATA, 2003). O campo de anomalia de ventos em 850 hPa (Fig. 7c) evidencia mais uma vez a estrutura barotrópica deste anticiclone, que em baixos níveis advecta ar úmido em direção ao estado de SP ao longo do mês de maio de 2017, alimentando as chuvas intensas. Neste nível também é possível observar o escoamento anômalo de noroeste sobre a Bolívia, Paraguai e Mato Grosso (20°S-60°W), indicando a persistência do JBN. A convergência destes dois escoamentos pode também ter sido uma forçante dinâmica favorável para o levantamento do ar ao longo do mês na região.

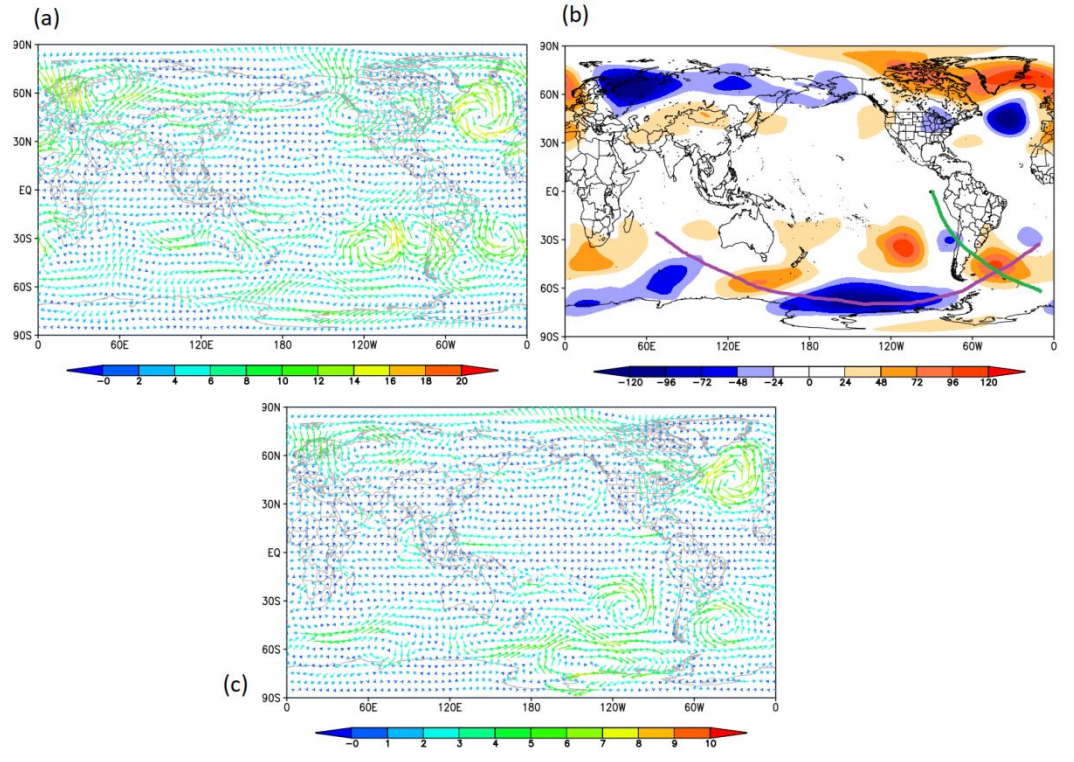

Figura 7 – (a) Anomalia de vento horizontal em 250 hPa no mês de maio de 2017; as cores representam a velocidade do vento, em m s^{-1}. (b) Anomalia de altura geopotencial (m) em 500 hPa no mês de maio de 2017; a linha verde sugere a trajetória do trem de ondas associado à teleconexão do Niño 1+2 e a linha roxa sugere o trem de ondas

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

associado à teleconexão do Dipolo do Índico. (c) Anomalia de vento horizontal em 850 hPa no mês de maio de 2017; as cores representam a velocidade do vento, em m s^{-1}. Todas as anomalias são referentes à climatologia de maio no período 1981-2019, e foram obtidas a partir da reanálise ERA5.

3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar se as teleconexões propostas no item anterior apresentam influência persistente sobre Bauru (e o centro-oeste paulista) durante os meses de maio, e não apenas neste ano de 2017 em específico, foi calculada a correlação parcial entre os índices climáticos e as anomalias de chuva registradas na cidade para este mês, durante o período de 1981 a 2019.

A série temporal da anomalia de chuva e dos índices, bem como a correlação entre eles, estão apresentados na figura 8. Os índices DAS e Niño 3.4, que não impactaram maio de 2017, mostraram pouca relevância nas condições do mês de maio em Bauru. Ambos os índices apresentaram correlação muito baixa com as anomalias de chuva, e sem significância estatística. Já os índices IOD e Niño 1+2 apresentaram correlação parcial positiva fraca (coeficientes de +0,3 e +0,4, respectivamente), com significância estatística de 95%. Apesar de modestos, os resultados para estes dois índices sugerem que tais oscilações climáticas podem apresentar influência considerável na chuva de Bauru durante o mês de maio. Mais estudos são necessários para determinar a extensão desta influência e sua variabilidade: por exemplo, no período aproximado entre 1991 e 1999, as anomalias de chuva seguiram fortemente o sinal do Niño 1+2, enquanto que entre 2012 e 2018, as alterações estiveram mais em fase com o IOD (Fig. 8). As razões para a influência mais forte deste ou daquele sinal em certos períodos devem ser tratadas em trabalho futuro.

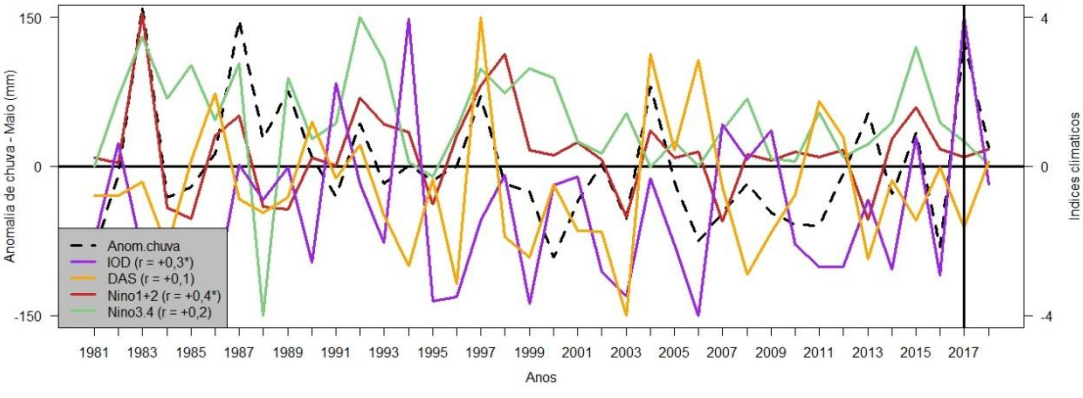

Figura 8 – Série temporal da anomalia mensal de precipitação na cidade de Bauru (linha tracejada, em mm) e dos índices climáticos (linhas coloridas) para todos os meses de maio no período 1981-2019. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os índices climáticos e a anomalia de precipitação na cidade de Bauru também é apresentado. O asterisco (*) ao lado do coeficiente indica as correlações que apresentaram significância estatísticas superior a 95% segundo teste *t-Student*.

A fim de quantificar o impacto da variação destes índices na precipitação, foram calculados, para as maiores correlações (IOD e Niño 1+2), os coeficientes das inclinações parciais das retas de regressão (b). Estes coeficientes podem ser interpretados como a variação que ocorre na anomalia de precipitação, a partir de uma variação em um dos índice climáticos, dado que o outro seja suposto

constante. A Tabela 1 mostra que uma variação de 1 desvio-padrão no índice Niño 1+2 (IOD) corresponde a uma variação de +0.35 (+0.26) desvio-padrão na anomalia mensal de precipitação sobre a cidade de Bauru, supondo que o outro índice se mantenha constante. O coeficiente de determinação múltiplo desta regressão tem valor 0,42, indicando que 42% da variabilidade da precipitação no mês de maio pode ser explicada pela atuação conjunta destes dois índices. Estes resultados mostram portanto que pode ser importante levar em conta as condições de TSM dos oceanos Índico e Pacífico Oeste em uma previsão climática operacional de precipitação para Bauru. Pensando em uma escala temporal mais longa, a relação entre a chuva intensa e as anomalias de TSM aqui exploradas podem ganhar importância ainda maior no futuro, visto que os eventos extremos associados a variações de TSM tiveram modificações significativas ao longo das últimas 4 décadas do século XX na região (HAYLOCK et al., 2006).

Tabela 1 – Coeficientes padronizados de inclinação parcial das retas de regressão entre anomalias de precipitação para o mês de maio (1981-2019) e os índices IOD e Niño 1+2.

β – IOD	β – Niño 1+2
0,26	0,35

4. CONCLUSÕES

Episódios de precipitação intensa no centro-oeste de São Paulo produzem sérias consequências sociais e econômicas, e tais eventos podem tornar-se mais frequentes em um cenário de mudanças climáticas. Por isso, é importante compreender as condições atmosféricas relacionadas, especialmente quando ocorrem em períodos fora da estação chuvosa. Este trabalho teve por objetivo descrever a situação sinótica e os padrões climatológicos que ocasionaram chuva intensa sobre o centro-oeste paulista em maio de 2017.

Foram identificados dois padrões sinóticos que resultaram nas chuvas mais volumosas durante o mês. O primeiro consistiu na passagem de um cavado em médios níveis da atmosfera sobre o estado de SP, forçando movimento ascendente na região. A sudoeste deste cavado, uma crista em 500 hPa induziu a formação de um anticiclone em baixos níveis centrado no Uruguai. Próximo a SP, a circulação deste anticiclone transiente ficou adjacente à circulação da ASAS, provocando convergência de massa e umidade que favoreceram fortes chuvas no início do mês. No segundo padrão sinótico observado, o escoamento divergente em altos níveis favoreceu movimento ascendente do ar, que estava bastante úmido sobre SP devido à circulação de JBN estabelecida em 850 hPa, com um padrão semelhante ao período de verão. A formação de um ciclone em superfície sobre a Argentina posicionou a convergência de umidade do JBN sobre SP, alimentando fortes chuvas que ocorreram por volta do dia 19 de maio.

Anomalias de TSM globais durante o mês de maio de 2017 evidenciaram a fase positiva do Dipolo do Índico e uma anomalia positiva de temperatura na região do Niño 1+2. Nos campos de vento horizontal e altura geopotencial, o mês registrou um padrão de ondas de Rossby barotrópicas no hemisfério Sul, que sustentou transporte de ar úmido do oceano em direção ao estado de SP em baixos níveis. O escoamento em direção a SP foi realizado principalmente

por um anticiclone anômalo, que pode ter se intensificado a partir da interação entre os trens de onda originados pelas anomalias de TSM do Dipolo do Índico e do Niño 1+2. Uma análise estatística de 39 anos mostrou que estes dois índices climáticos tem correlação positiva fraca, porém significativa, com a precipitação sobre Bauru e que, combinados, explicam 42% da variabilidade da precipitação de maio sobre a cidade. É importante ressaltar que a análise estatística aqui desenvolvida apresenta algumas limitações importantes, como a dependência da linearidade e normalidade das amostras de dados, o que nem sempre se verifica. Apesar disso, esta metodologia fornece uma indicação inicial relativamente confiável da associação entre os índices climáticos e a variabilidade da precipitação.

A determinação de condições sinóticas e a associação de eventos intensos/extremos de precipitação com índices climáticos são informações importantes que auxiliam na previsibilidade de tais eventos. Trabalhos futuros podem vir a complementar estas conclusões estendendo a análise a outros períodos do ano, com a utilização de estatísticas mais sofisticadas (que não apresentem restrições de linearidade e normalidade, por exemplo) e uma análise mais detalhada da origem e propagação das teleconexões atmosféricas associadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Meteorologia de Bauru (IPMET) e ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) pelo fornecimentos dos dados utilizados neste estudo. Agradecem também às sugestões e comentários dos revisores anônimos no aperfeiçoamento deste manuscrito.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRIZZI, T.; HOSKINS, B. J. Stationary Rossby-wave propagation in a baroclinic atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123(540), 919-928, 1997.

BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M.; JONES, C. e REBOITA, M. S. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. *Climate Dynamics*, 42(5-6), 1553-1568, 2014.

BRASILIENSE, C. S.; DERECZYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; da SILVA SANTOS, V. R. e CALADO, R. N. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. *Meteorological Applications*, 25(1), 66-77, 2018.

CALADO, G. G.; VALVERDE, M. C. e BAIGORRIA, G. A. Use of Teleconnection Indices for Water Management in the Cantareira System-São Paulo–Brazil. *Environmental Processes*, 6(2), 413-431, 2019.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, J. N.; SILVA, M. G. e DIAS, M. F. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 280 p.

CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. *Atmospheric Research*, 118, 27-40, 2012.

CHAN, S. C.; BEHERA, S. K. e YAMAGATA, T. (2008). Indian Ocean dipole influence on South American rainfall. *Geophysical Research Letters*, 35(14), 2018.

COELHO, C. A. S.; UVO, C. B. e AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. *Theoretical and applied climatology*, 71(3-4), 185-197, 2002.

DAI, A. e WIGLEY, T. M. L. Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1283-1286, 2000.

DIAS, M. A. S.; DIAS, J.; CARVALHO, L. M.; FREITAS, E. D. e DIAS, P. L. S. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, 116(3-4), 705-722, 2013.

DUFEK, A. S. e AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 93(3-4), 167-178, 2008.

GIMENEZ, D. F. S. Análise da precipitação pluvial e ocorrências de desastres naturais no estado de São Paulo (1976-2012). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 93 p, 2017.

GOZZO, L. F.; PALMA, D. S.; CUSTODIO, M. S. e MACHADO, J. P. Climatology and Trend of Severe Drought Events in the State of Sao Paulo, Brazil, during the 20th Century. *Atmosphere*, 10(4), 190, 2019.

HAYLOCK, M. R.; et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19(8), 1490-1512, 2006.

HEALEY, J. F. Partial Correlation and Multiple Regression and Correlation. In: *Statistics: A tool for social research*. 9ª Ed. Cengage Learning, 2012, Cap. 16, 433-456.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HORÁNYI, A.; SABATER, J. M.; NICOLAS, J., ... e DEE, D. (2019). Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsl*, *159*, 17-24.

IBGE. 2017. Contas regionais do Brasil 2017. ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Regionais/2017/ (accessado 11 de Fevereiro de 2020)

KELLER FILHO, T., ASSAD, E. D., e LIMA, P. R. S. D. R. Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(4), 311-322, 2005.

KODAMA, Y.-M. Large-scale common features of subtropicalprecipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and theSACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 813–835, 1992.

LIEBMANN, B.; VERA, C. S.; CARVALHO, L. M.; CAMILLONI, I. A.; HOERLING, M. P.; ALLURED, D.; ... e BIDEGAIN, M. An observed trend in central South American precipitation. *Journal of Climate*, 17(22), 4357-4367, 2004.

LIMA, A. P. e AMORIM, M. C. D. C. T. Análise de episódios de alagamentos e inundações urbanas na cidade de São Carlos a partir de notícias de jornal. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 10, v. 15, 182-204, 2015.

LIMA, G. N. De; LOMBARDO, M. A. e MAGAÑA, V. Urban water supply and the changes in the precipitation patterns in the metropolitan area of São Paulo–Brazil. *Applied Geography*, 94, 223-229, 2018.

MACHADO, J. P., MACHADO, C. F. C., e SCHIEWALDT, C. B. Eventos Extremos de Precipitação no Município de Bauru-SP: Possibilidade de Ocorrências de Desastres Naturais? *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(1), 255-266, 2019.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C. e NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. *Journal of Climate*, 17(12), 2261-2280, 2004.

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O. e RENOM, M. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98(3-4), 509-529, 2010.

MARENGO, J. A., LIEBMANN, B., GRIMM, A. M., MISRA, V., SILVA DIAS, P. L., CAVALCANTI, I. F. A., ... e SAULO, A. C. Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21, 2012.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. e OBREGON, G. O. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. *Climate Research*, 57(1), 61-72, 2013.

MORIOKA, Y.; TOZUKA, T. e YAMAGATA, T. On the growth and decay of the subtropical dipole mode in the South Atlantic. *J. Climate*, 24, 5538 – 5554, 2011

MUZA, M. N.; CARVALHO, L. M.; JONES, C. e LIEBMANN, B. Intraseasonal and interannual variability of extreme dry and wet events over southeastern South America and the subtropical Atlantic during austral summer. *Journal of Climate*, 22(7), 1682-1699, 2009.

NEELIN, J. D.; BATTISTI, D. S.; HIRST, A. C.; JIN, F. F.; WAKATA, Y.; YAMAGATA, T. e ZEBIAK, S. E. ENSO theory. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C7), 14261-14290, 1998.

NNAMCHI, H. C.; LI, J. e ANYADIKE, R. N. Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean?. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D15), 2011.

PINHEIRO, G. M. As chuvas extremas e suas repercussões no espaço urbano de Bauru/SP. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná. 164 p, 2013.

RAIMUNDO, C. D. C.; SANSIGOLO, C. A. e MOLION, L. C. B. Trends of rainfall classes in the metropolitan region of São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(3), 397-408, 2014.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T. e da ROCHA, R. P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terrae Didatica*, 8(1), 34-50, 2012.

RODRIGUEZ, C. A. M.; da ROCHA, R. P. e BOMBARDI, R. On the development of summer thunderstorms in the city of São Paulo: Mean meteorological characteristics and pollution effect. *Atmospheric Research*, 96(2-3), 477-488, 2010.

SAJI, N. H.; GOSWAMI, B. N.; VINAYACHANDRAN, P. N. e YAMAGATA, T. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360-363, 1999.

SAJI, N. H. e YAMAGATA, T. Possible impacts of Indian Ocean dipole mode events on global climate. *Climate Research*, *25*(2), 151-169, 2003.

SILVA, E. R. L. D. G. e SILVA, M. E. S. Memória de eventos enos na precipitação da América do Sul. *Revista do Departamento de Geografia*, 30, 34-55, 2015.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S. e ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 15, v. 25, 355-377, 2019.

TASCHETTO, A. S. e AMBRIZZI, T. Can Indian Ocean SST anomalies influence South American rainfall?. *Climate dynamics*, 38(7-8), 1615-1628, 2012.

TEIXEIRA, M. D. S. e SATYAMURTY, P. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960–2004. *Journal of Climate*, 24(7), 1913-1921, 2011.

VEMADO, F. e PEREIRA FILHO, A. J. Severe weather caused by heat island and sea breeze effects in the metropolitan area of São Paulo, Brazil. *Advances in Meteorology*, 2016

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M.; LIEBMANN, B. e SILVA DIAS, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2269-2279, 2017.

ZHOU, J. e LAU, K. M. Does a monsoon climate exist over South America?. *Journal of climate*, 11(5), 1020-1040, 1998