Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

DOI: 10.5380/abclima
Seção Temática: Prêmio ABClima "Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro" - Edição 2021

ANÁLISE DA TENDÊNCIA PLUVIOMÉTRICA NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

Analysis of the rainfall trend in the central region of the state of São Paulo

Análisis de la tendencia de las precipitaciones en la región central del estado de São Paulo

Rafael Grecco Sanches
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil
rafagsanches@alumni.usp.br

Bruno César dos Santos
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil
bruno-unifal@hotmail.com

Gustavo Zen de Figueiredo Neves
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil
gustavozen@usp.br

Maurício Sanches Duarte Silva
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil
msan80@gmail.com

Paulo Henrique de Souza
Instituto de Ciências da Natureza, Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG
phsouza31@hotmail.com

Resumo: A climatologia tropical se evidencia no comportamento das tendências nas chuvas nessa região central do estado de São Paulo. Para tanto, compreender seu comportamento temporal e espacial assume grande relevância, em função do impacto dessas na dinâmica urbana e rural, bem como para seu planejamento estratégico. Com isso, o estudo objetivou analisar com os dados diários,

às chuvas normais, intensas e extremas na região central do Estado de São Paulo, a fim de compreender sua evolução temporal e espacial, além de avaliar possíveis tendências para essa, que se insere na dinâmica tropical (sazonalmente, chuvoso/estiagem). Foram analisados 40 anos de dados diários de chuvas, em 31 postos pluviométricos. Utilizaram-se das tendências do teste de *Laplace factor* e o *outliers* sobre as tendências intensas e extremas (36mm e 46mm) para analisar os dados temporais históricos e das tendências pluviométricas. As chuvas diárias, tendem a se concentrar em dias com precipitações pluviométricas mais intensas ou extremas (mm), uma vez que os volumes anuais diminuem ou aumentam (ciclicamente) ao longo do tempo. Os resultados mostram uma tendência de neutralidade de chuvas intensas e aumento da tendência de episódios das chuvas extremas na região central do Estado de São Paulo. Dessa forma, esse cenário cada vez mais recorrentes podem causar diversos impactos ambientais, sociais e econômicos para a região paulista, tornando necessário uma maior atenção do setor público ou privado, sobre os possíveis impactos que esses eventos extremos pluviométricos possam causar no espaço geográfico e no tempo.
Palavras-chave: Climatologia geográfica. Climatologia estatística. Tendência pluviométrica. Chuva intensa. Chuva extrema.

Abstract: Tropical climatology is evident in the behavior of trends in rainfall in this central region of the state of São Paulo. Therefore, understanding their temporal and spatial behavior is of great importance due to their impact on urban and rural dynamics and their strategic planning. With this, the study aimed to analyze, with daily data, normal, intense, and extreme rains in the central region of the State of São Paulo, to understand its temporal and spatial evolution, in addition to evaluating possible trends for this, which is part of the tropical dynamics (seasonally, rainy/drought). Forty years of daily rainfall data analysis at 31 pluviometric stations. Laplace factor test trends and outliers on intense and extreme trends (36mm and 46mm) use to analyze historical temporal data and rainfall trends. Daily rainfall tends to be concentrated on days with more intense or extreme rainfall (mm) since annual volumes decrease or increase (cyclically) over time. The results show a tendency of neutrality of heavy rains and an increase in the tendency of episodes of extreme rains in the central region of the State of São Paulo. This increasingly recurring scenario can cause various environmental, social and economic impacts on the São Paulo region, making it necessary for the greater public or private sector to focus on the possible impacts of this extreme rainfall.
Keywords: Geographic climatology. Statistical climatology. Rainfall trends. Heavy rains. Extreme rains.

Resumen: La climatología tropical es evidente en el comportamiento de las tendencias de las precipitaciones en esta región central del estado de São Paulo. Por lo tanto, comprender su comportamiento temporal y espacial es de gran importancia, por su impacto en las dinámicas urbanas y rurales, así como para su planificación estratégica. Con eso, el estudio tuvo como objetivo analizar, con datos diarios, lluvias normales, intensas y extremas en la región central del Estado de São Paulo, para comprender su evolución temporal y espacial, además de evaluar posibles tendencias para eso, que es parte de la dinámica tropical (estacional, lluviosa/sequía). Se analizaron cuarenta años de datos de precipitaciones diarias en 31 estaciones pluviométricas. Las tendencias de la prueba del factor de Laplace y los valores atípicos en las tendencias intensas y extremas (36 mm y 46 mm) se utilizaron para analizar los datos temporales históricos y las tendencias de las precipitaciones. La precipitación diaria tiende a concentrarse en los días de precipitaciones más intensas o extremas (mm) ya que los volúmenes anuales disminuyen o aumentan (cíclicamente) con el tiempo. Los resultados muestran una tendencia de neutralidad de lluvias intensas y un aumento en la tendencia de episodios de lluvias extremas en la región central del Estado de São Paulo. De esta manera, este escenario cada vez más recurrente puede causar diversos impactos ambientales, sociales y económicos en la región de São Paulo, lo que hace necesaria una mayor atención por parte del sector público o privado, sobre los

posibles impactos que estos eventos extremos de lluvia pueden causar en el entorno geográfico. espacio y tiempo.
Palabras clave: Climatología geográfica. Climatología Estadística. Tendencias de precipitaciones. Lluvia intensa. lluvia extrema.

Submetido em: 17/02/2022
Aceito para publicação em: 30/05/2022
Publicado em: 10/06/2022

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica e os fluxos atmosféricos sul-americanos estão diretamente associados às chuvas, sendo que os aspectos físicos e de circulação da atmosfera tornam essa região do planeta uma das áreas com presença de chuvas mais intensas, destacando os ventos, uma vez que expressam áreas de convergência entre outras (SERRA; RATISBONNA, 1942).

As chuvas na América do Sul são heterogêneas e complexas para o entendimento, em face disto, inúmeros estudos buscaram compreender sua complexidade, sobretudo no território brasileiro, desenvolvendo uma análise temporal dos seus efeitos espaciais (CAVALCANTI, 2012; DUFEK; AMBRIZZI, 2008; HAYLOCK *et al*., 2006; VÁSQUEZ P. *et al*., 2018; ZILLI *et al*., 2017).

No sudeste brasileiro a ação das anomalias pode ser verificada por meio da influência em tendências para o aumento ou diminuição das temperaturas, bem como nas tendências dos volumes de chuvas (KAYANO; CAPISTRANO, 2014; PSCHEIDT; GRIMM, 2009; VÁSQUEZ P. *et al*., 2018). Por exemplo, na região central do Estado de São Paulo, notou-se em alterações nas tendências dos regimes das chuvas, ressaltando a influência das anomalias oceânicas nessa área, que reafirmam a necessidade em se observar a evolução temporal e as tendências para as chuvas nessa região do sudeste brasileiro (BLAIN, 2011, 2013; SANCHES *et al*., 2018; SANTOS *et al*., 2012).

As teleconexões, nesse sentido, contribuem para o entendimento da flutuação climática por meio de dados oceânicos do Atlântico e do Pacífico, como a OMA (Oscilação Multidecadal do Atlântico), as fases do *El Niño* – sua fase positiva (ENSO – El Niño Oscilação Sul; aumento na temperatura do Pacífico) e *La Niña* – sua fase negativa (resfriamento na temperatura do Pacífico), e, a ODP (Oscilação Decadal do Pacífico), por exemplo. (KAYANO; CAPISTRANO, 2014; PSCHEIDT; GRIMM, 2009; VÁSQUEZ P. *et al*., 2018).

Por seu turno, os episódios de chuvas intensas e extremas, que expressam elevados volumes de chuvas em curtos períodos de tempo (horário ou diário), representam um dos elementos mais estudados e dinâmicos em climatologia, uma vez que se associam às enchentes, escorregamentos, perda de safras agrícolas, entre outros impactos junto aos espaços rural e urbano.

No entanto, para sua determinação, observou-se diferentes critérios, em diferentes escalas espaciais, como valores fixos de extremos de chuvas correspondem a 60 mm em único dia (LIMA; AMORIM, 2015), ou mesmo quando as chuvas estiveram abaixo ou acima desse valor, e ocasionaram danos (SANCHES *et al*., 2018). Segundo Oliveira; Galvani (2017), os valores extremos de chuvas podem ser associados à sua intensidade, conforme determina a OMM (Organização Meteorológica Mundial).

Uma das maneiras de verificar a ocorrência de um episódio de chuva intensa e extrema é feita por meio da frequência de sua distribuição. Nesse sentido, vários estudos que analisaram a distribuição temporal das chuvas, bem como suas tendências temporais, analisaram a tendência de aumento nos volumes pluviométricos no Estado de São Paulo, especialmente para os valores extremos, ainda que se observa nos últimos anos alguns períodos secos de estiagem prolongada (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; LIMA; ZILLI *et al*., 2017; RAFEE *et al*., 2020).

Além disso, o caráter regional contribui para a compreensão das especificidades regionais do clima no Estado de São Paulo. Para tanto, analisar a tendência de aumento/diminuição nas chuvas, o aumento no número de episódios extremos de chuvas (acima de 40 mm), por sua magnitude e frequência, o aumento dos valores diários pluviométricos e as mudanças observadas no último século para as chuvas no sudeste brasileiro foram alguns dos esforços apontados em tais estudos regionais (MARENGO *et al*., 2010; SUGAHARA; ROCHA; SILVEIRA, 2009; ZILLI *et al*., 2017)

No entanto, observou-se diversos apontamentos para mudanças no padrão regional das chuvas, no sudeste brasileiro e, especificamente, no Estado de São Paulo, inclusive os efeitos urbanos e de relevo. Dentre esses, o aumento nos dias chuvosos com baixo volume pluviométrico, a concentração do volume de chuvas em um menor número de dias chuvosos no Estado de São Paulo, além de suas mudanças em padrões extremos (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; HAYLOCK *et al*., 2006; VÁSQUEZ P. *et al*., 2018; ZILLI *et al*., 2017).

Em função do caráter regional, no interior do Estado de São Paulo, região próxima à área objetivada pelo presente estudo, notam-se apontamentos para alterações nos regimes de chuvas totais, interanuais e extremos, além de ressaltar a influência das anomalias oceânicas nessa área, que reafirmam a necessidade de se observar a evolução temporal e as

tendências para as chuvas nessa região do sudeste brasileiro (BLAIN, 2011, 2013; SANCHES *et al*., 2018; SANTOS *et al*., 2012).

Assim como, as chuvas extremas no sul da bacia do Paraná houveram aumento e, com maior do que 50mm das precipitações. No norte, as chuvas anuais apresentaram tendências pluviométricas decrescente e crescente, respectivamente (RAFEE *et al*., 2020).

A variabilidade pluviométrica, principal elemento discutido na maioria dos estudos em climatologia regional (ou seja, as isotermas das médias anuais e do mês mais quente, que tendem a acompanhar entre os trópicos e nos principais paralelos), nessa região do planeta, expressa inúmeras possibilidades e lacunas a serem preenchidas, por meio de estudos de natureza estatística (AYOADE, 1996), ou seja, descreveram com maior detalhe os sistemas atmosféricos e as características em climatologia térmica e pluviométrica da região (NIMER, 1979).

Dentre esses, o aumento nos dias chuvosos com baixo volume pluviométrico, a concentração do volume de chuvas em um menor número de dias chuvosos, entre outros. Dessa forma, estudos que possibilitem a compreensão dos dados pluviométricos, seu comportamento sazonal na região e as tendências para as chuvas, em seu total ou em eventos extremos, apresentam grande interesse em climatologia (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; HAYLOCK *et al*., 2006; VÁSQUEZ P. *et al*., 2018; ZILLI *et al*., 2017)

Atentando para isto, este estudo busca contribuir com a compreensão das tendências das chuvas diárias em uma das regiões do Brasil onde os aspectos do clima são mais heterogêneos espacial e temporalmente. Para isso, analisa a tendências das chuvas diárias intensas e extremas por meio do teste de Laplace, durante um período de 40 anos.

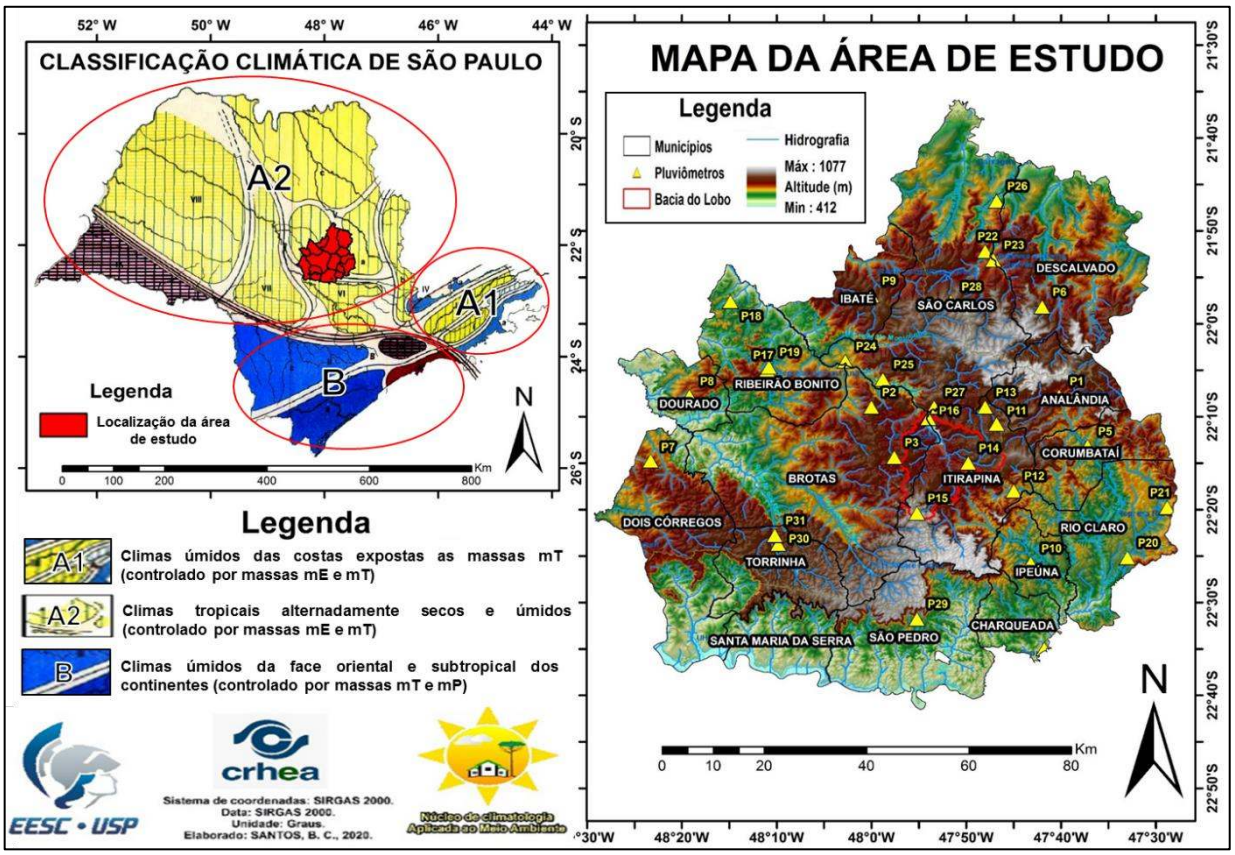
2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A área de estudo, situa-se na região Sudeste do Brasil, no centro-leste do estado de São Paulo, totalizando uma área de 9.151,7 km² e que integra um total de 16 municípios: Analândia, Brotas, Charqueada, Corumbataí, Descalvado, Dois Córregos, Dourado, Ibaté, Ipeúna, Itirapina, Ribeirão Bonito, Rio Claro, Santa Maria da Serra, São Carlos, São Pedro e Torrinha (Figura 1).

Tais municípios enquadram, segundo a classificação de Monteiro (1973), em climas regionais tropicais alternadamente secos (abril a setembro) e úmidos (outubro a março) com predomínio do tipo *A2/Vb* (Serra de São Carlos).

Figura 1 - Localização da área de estudo (vermelho) dentro da classificação climática de São Paulo. Os pontos em amarelo indicam a localização dos postos pluviométricos. A linha em vermelho delimita a bacia hidrográfica do reservatório do Broa, como as unidades climáticas classificadas por Monteiro (1976).



Fonte: Autores.

Na região central do Estado de São Paulo há a participação das massas de ar tropicais e polar, que incidem sobre a porção Centro-Sul do Brasil e, que, contribuem na formação da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul). Essa dinâmica, representa uma característica importante da distribuição das chuvas, principalmente relacionada ao padrão de circulação atmosférica regional, o que acaba por levar a episódios excepcionais na região (ZILLI et al., 2017; SANCHES et al., 2018; SANTOS et al., 2017; 2018 e 2020).

Em termos geomorfológicos, a área encontra-se na transição entre duas: o Planalto Ocidental, formada numa grande zona de relevo suave compostas por colinas, morros baixos

e serras, com uma altitude média aproximadamente de 900m e a Depressão Periférica Paulista apresentando um relevo predominantemente colinoso e suave, além de morros e serras isoladas com níveis de aproximadamente 600m (ROSS; MOROZ, 1997; PINHEIRO; QUEIROZ NETO, 2014).

Dessa forma, toda a conjuntura das serras situadas ao norte e ao sul da área tem um papel fundamental em colaborar com a dinâmica da circulação regional, principalmente, quando está sob a influência dos diferentes sistemas atmosféricos que possam contribuir na formação ou intensificação das chuvas orográficas durante as sazonalidades do ano (SANTOS *et al*., 2018).

2.2. Seleção dos Dados Pluviométricos

Para a realização do estudo, foi selecionado 31 postos pluviométricos (Figura 1) com séries históricas de 40 anos (01/01/1979 a 31/122019) e que tenham o mínimo possível de falhas. Para o acesso aos dados de chuva, foram consultadas: a plataforma online *hidroweb*, pertencente a Agencia Nacional de Águas (ANA) e pelo o site do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). A Tabela 1, apresenta as informações dos postos pluviométricos escolhidos para a área de estudo.

Tabela 1 - Informações sobre os postos pluviométricos selecionados dentro da área de estudo.

CÓDIGO DO POSTO	NOME DO POSTO	ÓRGÃO RESPONSÁVEL	MUNICÍPIO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (Metros)	FALHAS (%)
2247004	ANALÂNDIA	DAEE-SP	ANALÂNDIA	-22 7 48.000	-47 40 12.000	660	**0,4%**
2247185	FAZENDA CAMPO ALEGRE	ANA	BROTAS	-22 9 0.000	-48 0 0.000	733	**8,1%**
2247197	EST. FERROVIÁRIA CAMPO ALEGRE	ANA	BROTAS	-22 14 24.000	-47 57 36.000	747	**4,4%**
2247208	RECREIO	DAEE-SP	CHARQUEADA	-22 35 1.000	-47 41 47.000	530	**0%**
2247010	CORUMBATAI	DAEE-SP	CORUMBATAÍ	-22 13 12.000	-47 37 12.000	600	**0,4%**
2147043	FAZENDA SANTA RITA	DAEE-SP	DESCALVADO	-21 58 12.000	-47 42 0.000	780	**0,2%**
2248116	GUARAPUA	DAEE-SP	DOIS CORREGOS	-22 14 46.000	-48 23 18.000	719	**13,8%**
2248009	DOURADO	DAEE-SP	DOURADO	-22 7 48.000	-48 19 12.000	700	**0,6%**
2148164	IBATÉ	ANA	IBATÉ	-21 57 0.000	-48 0 0.000	-	**7%**
2247021	IPEUNA	DAEE-SP	IPEUNA	-22 25 48.000	-47 43 12.000	630	**7%**
2247198	FAZENDA PEQUENA HOLANDA	ANA	ITIRAPINA	-22 10 48.000	-47 46 48.000	780	**2,7%**
2247015	GRAUNA	DAEE-SP	ITIRAPINA	-22 18 0.000	-47 45 0.000	610	**4,4%**
2247006	VISCONDE DE RIO CLARO	DAEE-SP	ITIRAPINA	-22 9 0.000	-47 48 0.000	740	**11,5%**
2247180	ITIRAPINA	ANA	ITIRAPINA	-22 15 0.000	-47 49 48.000	739	**10,4%**
2247184	ITAQUERI DA SERRA	ANA	ITIRAPINA	-22 20 24.000	-47 55 12.000	894	**2,7%**
2247196	CRHEA-BROA	ANA	ITIRAPINA	-22 10 12.000	-47 54 0.000	732	**0%**
2248005	RIBEIRÃO BONITO	DAEE-SP	RIBEIRÃO BONITO	-22 4 48.000	-48 10 48.000	590	**7%**
2148168	GUARAPIRANGA	ANA	RIBEIRÃO BONITO	- 21 57 36.000	-48 15 0.000	-	**7,2%**
2248110	RIBEIRÃO BONITO 2	ANA	RIBEIRÃO BONITO	-22 4 48.000	-48 10 48.000	486	**6,4%**
2247020	RIO CLARO	ANA	RIO CLARO	-22 25 12.000	-47 33 0.000	600	**2,1%**
2247018	FAZENDA SÃO JOSÉ	DAEE-SP	RIO CLARO	-22 19 48.000	-47 28 48.000	600	**5,5%**
2147059	USINA CAPÃO PRETO	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-21 52 12.000	-47 48 0.000	610	**8,3%**
2247060	FAZENDA DA BARRA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-21 53 8.000	-47 47 9.000	610	**0,2%**
2247109	FAZENDA AGUA BRANCA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-22 4 3.000	-48 2 46.000	598	**2,1%**
2247206	FAZENDA SANTA BÁRBARA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-22 6 0.000	-47 58 48.000	780	**1,4%**
2147031	SANTA EUDOXIA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-21 46 48.000	-47 46 48.000	620	**1,2%**
2247182	RIBEIRÃO DO FEIJÃO	ANA	SÃO CARLOS	-22 9 0.000	-47 53 24.000	676	**4,4%**
83726	INMET/UFSCar	INMET	SÃO CARLOS	-21 57 37.723	-47 51 37.650	856	**3,2%**
2247025	SÃO PEDRO	DAEE-SP	SÃO PEDRO	-22 31 48.000	-47 55 12.000	600	**1,4%**
D5-006	SITIO BOA VISTA	DAEE-SP	TORRINHA	-22 23 45.000	-48 9 50.000	783	**1,7%**
2248045	PCH TRÊS SALTOS	JAYADITYA	TORRINHA	-22 22 48.000	-48 10 12.000	720	**1,7%**

Fonte: *Hidroweb*-ANA (2019).

2.3. Análise das chuvas diárias

Atualmente, destacam-se as observações de índices climáticos para observação dos dados pluviométricos, como o pacote RClimdex (ZHANG; YANG, 2004; HAYLOCK et. al., 2006; STEPHENSON et. al., 2014; SANTOS; RAMOS, 2018; SANCHES et al., 2018), que ressalta a análise de diferentes índices para temperatura e, no caso do presente artigo, para os de pluviometria.

Diversos trabalhos utilizaram a ferramenta a fim de analisar a evolução temporal e espacial dos climas em diferentes regiões do Brasil e de outros países (DRUMOND; AMBRIZZI, 2008; DUFEK; AMBRIZZI, 2008; HAYLOCK et al., 2006; MEKIS; VINCENT, 2011; SANTOS et al., 2012; SANTOS; RAMOS, 2018; STEPHENSON et al., 2014).

Para o presente trabalho, foi utilizado o índice de precipitação (Tabela 2), que calcula por meio dos dados diários, o número de dias acima de valores pré-estabelecidos a partir da detecção de outliers (Rnn*).

O Rnn, se destaca por representar o número de dias acima de um valor definido, destacando sua possibilidade de ajustes nos valores-base, ou seja, permitindo atribuir um valor referencial para eventos intensos ou extremos aos valores de precipitação.

Tabela 2 - Metodologia Utilizada para Análise dos Dados de Precipitação.

Índice (Identificação)	Nome do índice	Definição	Unidade Observada
Rnn*	Dias chuvosos acima de *nn* milímetros	Número de dias acima de *nn* milímetros de chuva	Dias

*Admite-se RR_{ij} como a quantidade diária de precipitação num dia *i* num período *j*. Assim, *nn** representa qualquer valor razoável de precipitação diária, onde soma-se o número de dias, sendo: $RR_{ij} \geq nnmm$

Fonte: Adaptado de Zhang e Yang (2004)

Dessa forma, a determinação do valor de nn* de chuvas de comportamento anômalo foi realizada por meio de outliers. Segundo Chrun, Cukier e Sneeringer (2008), a determinação do outlier pode ser entendida por uma avaliação da evolução e da identificação de comportamentos excepcionais em séries históricas dos dados, identificando-os a partir da média e utilizando três ou quatro desvios padrões por limite (Equação 3).

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} + t * \sqrt{\frac{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n}{n}} = Outlier\ (Observação\ Anormal) \quad \text{Equação (3)}$$

em que xi, representa o volume de chuvas em um dia i em mm e n e que denota a quantidade de dias. A constante t pode assumir os seguintes valores: 3 para identificação de chuvas intensas e 4 para chuvas extremas.

Para este trabalho, foi utilizado como *ouliers* para chuva intensa e extrema, os valores diários em milímetros determinado por Sanches, 2018. Segundo Sanches (2018), os dias que ocorreram chuvas de abaixo de 36mm, são considerados chuvas normais, dias com chuvas acima de 36mm até 46mm, são considerados chuvas intensas e os dias com chuvas acima de 46mm, são considerados chuvas extremas para a área de estudo. A partir desses, foram selecionados para a análise das tendências, os valores diários de chuvas normais, intensas e extremas encontrados dentro do recorte histórico (01/01/1979-31/12/2019) dos 31 postos pluviométricos selecionados.

2.4. Análise da tendência anual das chuvas

A observação temporal da precipitação é de interesse substancial, embora diferentes técnicas sejam empregadas para análises espaciais e temporais. Assim, a observação de tendências em estações pluviométricas compreende a principal forma de compreensão e aplicabilidade, como frequência, picos de variância e significância, entre outros aspectos estatísticos (DUFEK; AMBRIZZI, 2008; SANCHES, 2019).

Vale ressaltar aqui a importância da observação das tendências temporais e espaciais das chuvas por meio de índices climáticos, em termos de volume e acumulados diários (HAYLOCK, et al., 2006; DUFEK; AMBRIZZI, 2008), da correlação entre as chuvas e anomalias oceânicas (HAYLOCK et al., 2006; SUGAHARA et al., 2009; SANTOS et al., 2012; ZILLI et al., 2017; VÁSQUEZ et al., 2018) e, até, pela interpolação de dados espaciais, seja com dados de satélites ou superfície (RAO et al., 2016).

Para isso, métodos estatísticos têm uma boa precisão das chuvas nos climas tropicais das tendências pluviométricas (PARMAR *et al*., 2017; PHAM *et al*., 2020). Com a finalidade de

entender sobre a sazonalidade das tendências pluviométricas ao longo dos últimos quarenta anos (1979-2019), foi realizado o cálculo das tendências diárias das chuvas.

O método conhecido como *'Laplace Test'* (*Laplace trend factor*), foi aplicado no conjunto de dados para observar as tendências dos valores de precipitação diária ao longo do tempo na área estudada. Esse teste, é comumente utilizado na literatura para identificar tendências em diferentes situações, tais como: falhas de software de modelagem (SUKHWANI et al., 2016), identificando tendências em vulnerabilidades de segurança computacional (MIANI et al., 2015).

Portanto, o teste consiste em examinar os valores de tendência dos dados pluviométricos em um determinado período e identificar as tendências de aumento ou diminuição da precipitação diária, em um conjunto de dados baseado em um valor u(t), considerando um dado período [0, t], pela seguinte Equação 2 (KANOUN et al., 1991):

Eq. (2)

$$u(t) = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{t}((i-1)n_i)}{N(t)} - \frac{(t-1)}{2}}{\sqrt{\frac{t^2-1}{12(N(t))}}}$$

Em que t, representa o número de meses e ni, é a variável analisada no tempo i (valor da precipitação anual dos postos) e N(t), indica o número cumulativo em relação à variável analisada.

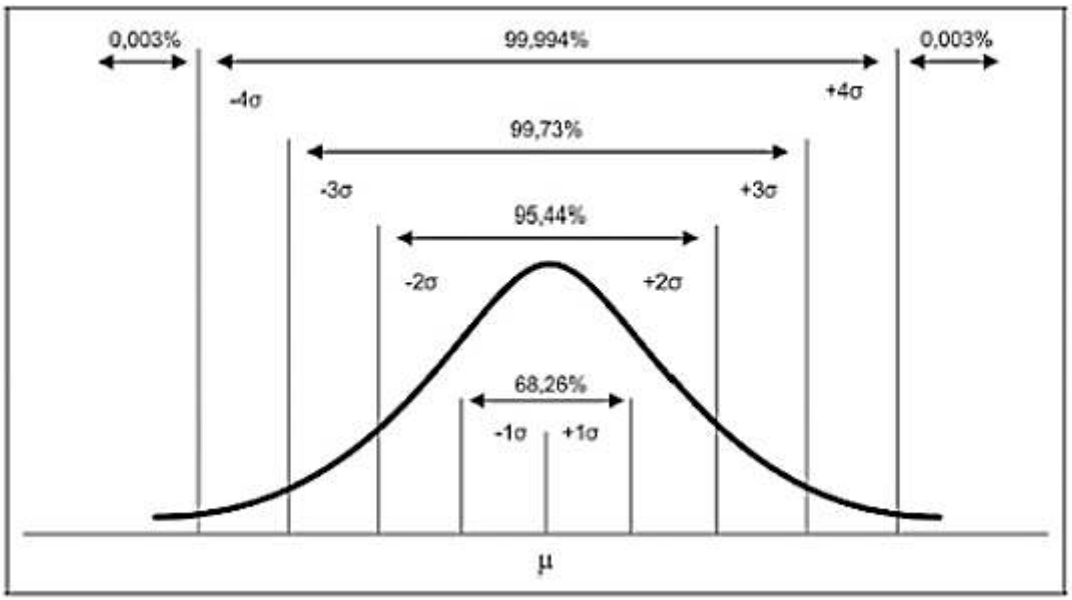
Para interpretação prática do teste, foi considerado como intervalo de confiança, desvios variando entre [-2 e 2] como critério de decisão análogo à distribuição normal, ou seja, intervalos de 2 desvios (superior 95,44%), conforme apresentado na Figura 2 (CHRUN, 2011; CHRUN *et al*., 2008).

Portanto, quando os valores do coeficiente de Laplace são maiores que +2, as tendências são positivas (aumento), valores menores que -2, as tendências são negativas (diminuição) e valores entre -2 e +2, indicam estabilidade.

Por último, os cálculos foram realizados no software Microsoft Office Excel 2007, onde também foram elaborados tabelas e gráficos dos resultados obtidos por meio dos métodos aplicados. Para uma melhor interpretação das tendências, os resultados foram agrupados e

espacializados na forma de mapas por meio de uma ferramenta Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando a técnica da ponderação pelo inverso da distância (FARIAS et al., 2017).

Figura 2 - Distribuição normal padrão de Laplace.



Fonte: Sanches (2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

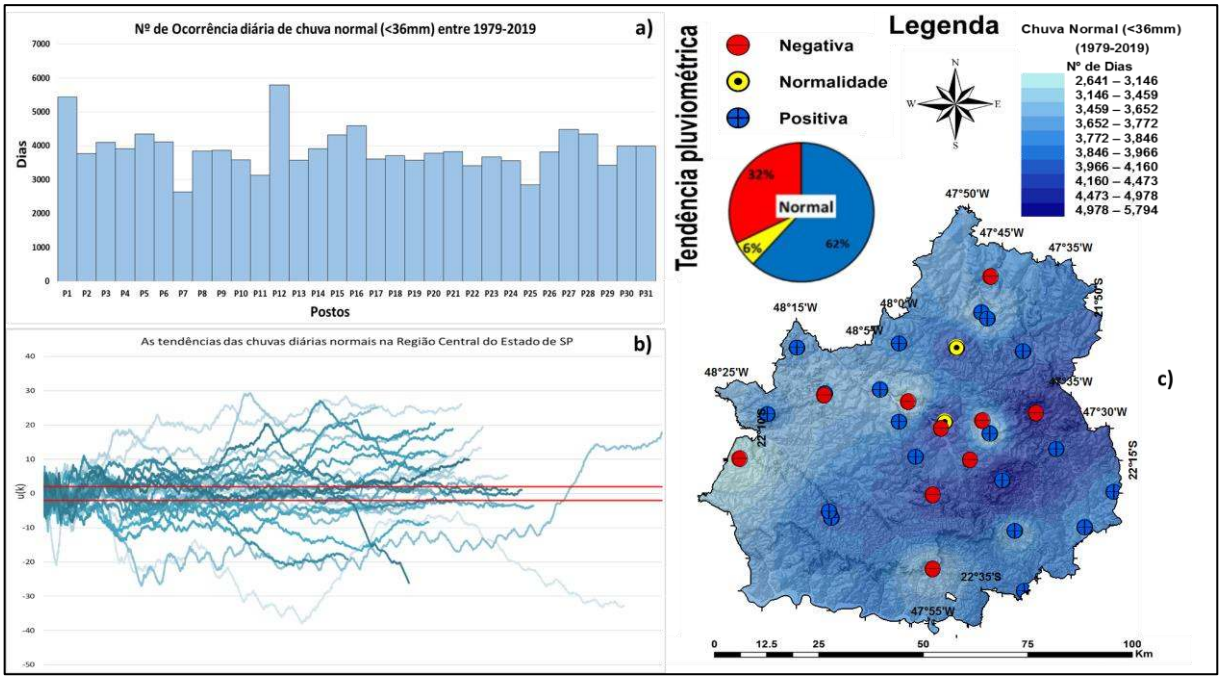
3.1. Tendências das chuvas diárias (normal, intensa e extrema)

A Figura 3 resume os resultados para a análise das chuvas diária normal abaixo de 36mm. Nota-se na Figura 3(a), que as ocorrências de chuvas normal obteve valores entre 3000 a 4000 dias para a maioria dos postos ao longo dos 40 anos. Porém, alguns postos apresentaram uma ocorrência máxima acima de 5000 dias e uma ocorrência mínima abaixo de 3000 dias.

Na Figura 3(b), observou que as tendências dos dias de chuvas normal passaram por momentos aumento (valores acima de +2) e outros momentos de diminuição (valores abaixo de -2) ao longo da série histórica. Nos últimos anos da série, observou uma tendência aumento das chuvas diárias, para a maioria dos postos. Porém, outros demonstraram tendências dentro da normalidade ou redução das chuvas diárias normal.

O mapa na Figura 3(c), demostra de forma espacial as tendências para os dias das chuvas normal para a área de estudo. Nota-se, que cerca de 62% dos postos pluviométricos manifestaram um aumento e de 32% uma redução das tendências das chuvas diárias. Para o caso das tendências dentro da normalidade, ocorreram apenas em 6% dos postos de superfície. Vale destacar, que a região centro-leste mostra maior ocorrência de dias de chuvas normal (<36mm), porém em outras áreas demonstrou redução na ocorrência de dias.

Figura 3 - Chuvas diárias normal (<36mm) entre 1979 a 2019.



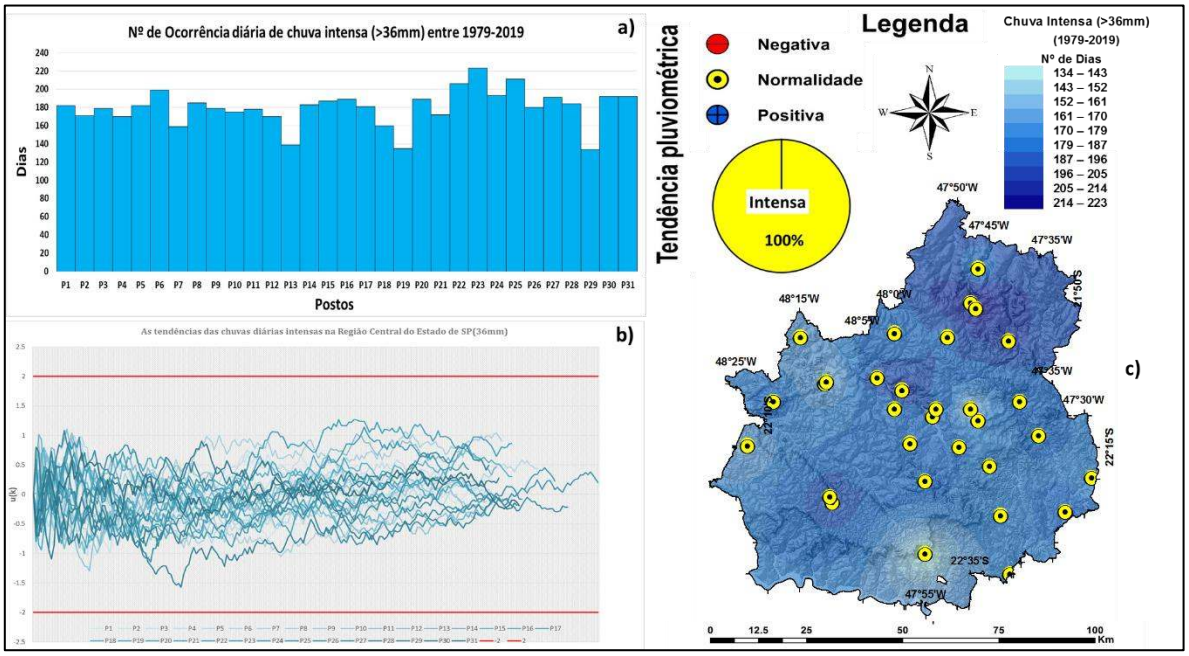
Fonte: Autores.

A Figura 4 resume os resultados para a análise das chuvas diária intensa entre 36mm e 46mm. Nota-se na Figura 4(a), que a ocorrência de dias obteve valores acima de 140 dias para a maioria dos postos ao longo dos 40 anos. Em geral, todos os postos apresentaram em média cerca de 179 dias com chuvas entre 36mm e 46mm na série histórica. Porém, a ocorrência mínima ficou acima de 130 dias (P29) e a máxima de cerca de 223 dias (P23).

Na Figura 4(b), demonstra que as tendências dos dias de chuvas intensas permaneceram dentro do intervalo de (+2) e (-2), ou seja, tendências dentro da normalidade ao longo dos 40 anos. O mapa na Figura 4(c), resume de forma espacial as tendências das chuvas diárias intensas (>36mm a 46mm) para a área de estudo. As tendências indicam

estabilidade em todos postos pluviométricos com 100% dentro do padrão pluviométrico para área de estudo.

Figura 4 - Chuvas diárias intensas (>36mm a 46mm) entre 1979 a 2019.



Fonte: Autores.

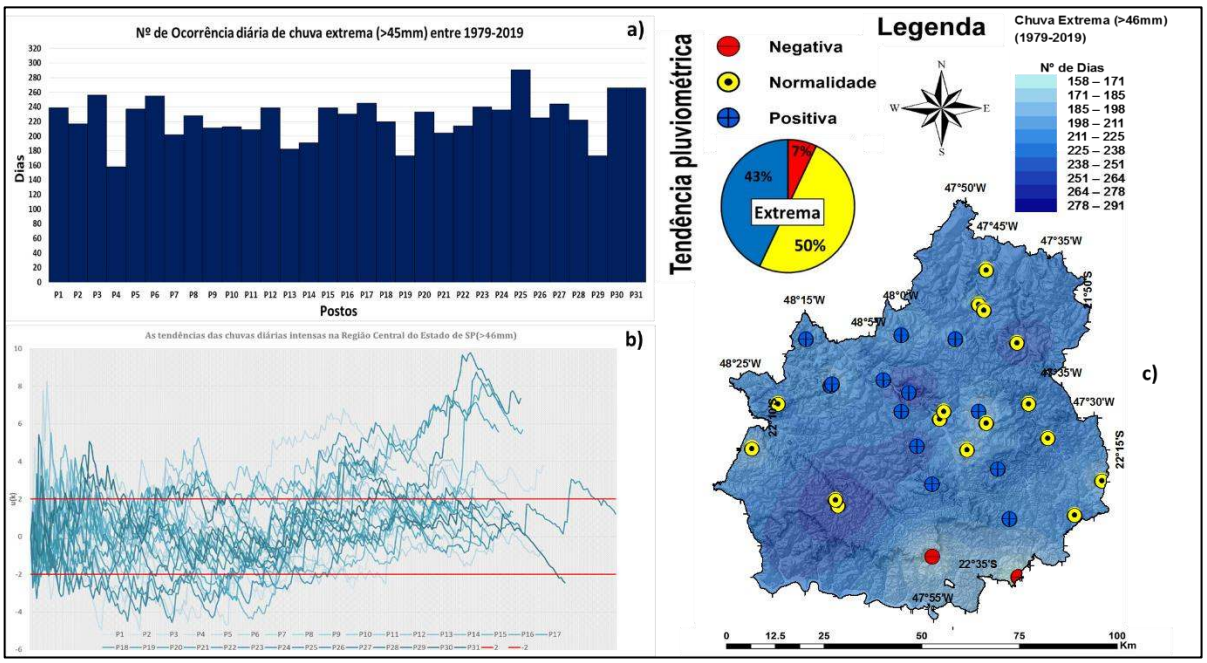
Esse padrão de tendência favorece a identificação de episódios de chuva intensas com maior probabilidade, podendo gerar repercussões espaciais negativas, principalmente, nas regiões ao norte e sul da área de estudo, sendo aquelas que apresentaram as maiores ocorrências de dias de chuvas intensas na área de estudo.

A Figura 5 resume os resultados para a análise das chuvas diária extrema acima de acima 46mm. Nota-se na Figura 5(a), que a ocorrência de dias de chuvas extrema obteve valores acima de 140 dias para a maioria dos postos ao longo dos 40 anos. Porém, a ocorrência mínima de dias foi acima de 158 dias (P4) e a máxima acima 290 dias (P25). Na média, os postos apresentam cerca de 224 dias de chuvas acima de 46mm na série histórica.

O mapa na Figura 5(c), resume de forma espacial a tendência diária das chuvas extrema (>46mm) para dentro da área de estudo. A tendência para a área de estudo apresentou 50% dentro da normalidade, ou seja, dentro do padrão diário das chuvas extremas. No entanto, cerca de 47% dos postos pluviométricos indicaram tendências positivas e, apenas 7% demonstram tendências de redução de dias extremos. Além disso, a região centro-sul no

mapa demonstra maior ocorrência de dias de chuvas extrema. Em relação a outras áreas, a região a sudeste no mapa, mostrou menores ocorrências e sendo a única que também apontou tendências de redução de dias extremos de chuva.

Figura 5 - Chuvas diárias intensas (>46mm) entre 1979 a 2019.



Fonte: Autores.

Dentre as principais justificativas para tal variação das tendências, destacam-se as influências oceânicas por meio das teleconexões, em que as chuvas se mostraram com grande variabilidade interanual, que coincide com fases positivas e negativas (aquecimento e resfriamento, respectivamente) nos oceanos, especialmente, o Pacífico pela Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Sudeste do Pacífico (ENSO) – *El Niño* e *La Niña*, respectivamente (VÁSQUEZ P. *et al*., 2018).

Em estudos anteriores na região, verificaram-se mudanças no padrão de precipitação e sua correlação com o ENSO (*El Niño Southern Oscilation*) (TEIXEIRA; SATYAMURTY, 2011; YOULTON *et al*., 2012), com a flutuação de outliers e seu aumento nos últimos anos (SANCHES, 2015; SANCHES *et al*., 2018), com o aumento da variabilidade das chuvas extrema (BLAIN, 2013) e com chuvas extremas mais frequentes próximo à região de estudo (SANTOS *et al*., 2012), o que corrobora com os resultados obtidos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com o teste de tendência de Laplace para as chuvas diárias (normal, intensa e extrema) para as 31 estações de superfície localizadas na região central do Estado de São Paulo, se mostraram coesos para as chuvas regionais da área de estudo.

Entre as tendências analisadas, houve um aumento de 62% de dias para chuvas normais (<36mm) e de 43% dias para chuvas extremas (>46mm). Quanto aos dias dentro da normalidade, a tendência das chuvas intensas foi de 100% e das chuvas extremas de 50%. Apenas 7% dos postos pluviométricos demonstram dias com tendências de redução de episódios de chuvas extremas na região central do Estado de São Paulo.

Diante desse cenário, as chuvas diárias na região central do estado de São Paulo vêm demonstrando tendência no aumento de extremos. Sendo assim, as chuvas estão concentrando um volume em 24 horas acima de 46mm. Dessa forma, torna-se necessário implementar políticas para que possam mitigar os possíveis impactos que esses eventos extremos possam causar no espaço geográfico.

Por fim, a compreensão das tendências das chuvas em seu volume diário (mm) usando a ferramenta do teste de Laplace, permite projetar esse tipo de avaliação em função da precipitação na escala diária e, portanto, reafirmando o potencial dessa ferramenta para esses estudos em série histórica de dados, sem deixar de lado a importância de outras técnicas já validadas neste tipo de avaliação.

REFERÊNCIAS

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BARRY, G.R.; CHORLEY, J.R. **Atmosfera, tempo e clima**. 9. ed. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2013.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. p. 177-241.

BLAIN, G. C. Totais decendiais de precipitação pluvial em Campinas, SP: persistência temporal, periodicidades e tendências climáticas. **Ciência Rural**, v. 41, n. 5, p. 789–795, 2011.

BLAIN, G. C. Seasonal variability of maximum daily rainfall in Campinas, state of Sao Paulo, Brazil: trends, periodicities, and associated probabilities/ Variabilidade inter-sazonal da precipitacao pluvial maxima diaria em Campinas, estado de Sao Paulo: tendencias,

periodicidades e probabilidades associadas. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 35, n. 3, p. 557-, 2013.

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**, v. 118, p. 27–40, 2012.

CHRUN, D. Model-Based Support for Information Technology Security Decision Making. , 2011. Disponível em: <http://drum.lib.umd.edu/handle/1903/11555>. Acesso em: 17/10/2018.

CHRUN, D.; SNEERINGER, G.; CUKIER, M. On the Use of Security Metrics Based on Intrusion Prevention System Event Data: An Empirical Analysis. 2008 11th IEEE High Assurance Systems Engineering Symposium(HASE). **Anais.** p.49–58, 2008. Disponível em: <doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/HASE.2008.52>.

DINKU, T.; CECCATO, P.; CONNOR, S. J. Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 21, p. 5965–5979, 2011. Taylor & Francis.

DINKU, T.; FUNK, C.; PETERSON, P.; et al. Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 144, n. S1, p. 292–312, 2018.

DUFEK, A. S.; AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n. 3, p. 167–178, 2008.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; et al. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 2006.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall: AMO MODIFIES ENSO INFLUENCE. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162–178, 2014.

LIMA, A. P.; AMORIM, M. C. DE 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**, v. 15, n. 0, 2015. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/33406>. Acesso em: 22/11/2017.

MIANI, R. S.; ZARPELAO, B. B.; SOBESTO, B.; CUKIER, M. A Practical Experience on Evaluating Intrusion Prevention System Event Data as Indicators of Security Issues. 2015 IEEE 34th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS). **Anais...** . p.296–305, 2015.

MONTEIRO, C. A. F. A **Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de atlas**. São Paulo: USP/IG, 1973.

MONTEIRO, C. A. F. O Clima e a organização do espaço no Estado de São Paulo: problemas e perspectivas**.** São Paulo, **Série Teses e Monografias**, 28, USP/IGEOG, 1976.

MONTEIRO, C. A. F. **Clima e Excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: UFSC, 1991.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1979. (Série Recursos Naturais e Meio Ambiente, 4).

PINHEIRO, M.R.; QUEIROZ NETO, J.P. Reflexões sobre a gênese da Serra Geral e da Depressão Periférica Paulista: O exemplo da região da Serra de São Pedro e do Baixo Piracicaba, SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 35, n. 1, p. 47-59, 2014.

OLIVEIRA, M. R. P. DE; GALVANI, E. Eventos Extremos de Precipitação no Perfil Longitudinal Paraty (RJ) - Campos do Jordão (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 0, n. spe, p. 58–66, 2017.

PARMAR, A.; MISTREE, K.; SOMPURA, M. **Machine Learning Techniques For Rainfall Prediction: A Review**. 2017.

PHAM, B. T.; LE, L. M.; LE, T.-T.; et al. Development of advanced artificial intelligence models for daily rainfall prediction. **Atmospheric Research**, v. 237, p. 104845, 2020.

PSCHEIDT, I.; GRIMM, A. M. Frequency of extreme rainfall events in Southern Brazil modulated by interannual and interdecadal variability. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 13, p. 1988–2011, 2009.

RAFEE, S. A. A.; FREITAS, E. D.; MARTINS, J. A.; et al. Spatial Trends of Extreme Precipitation Events in the Paraná River Basin. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 3, p. 443–454, 2020. American Meteorological Society.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; SANTO, C. M. E.; GAN, M. A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979–2011. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 291–302, 2016.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 41-58, 1996.

SANCHES, R. G. **As chuvas na região de São Carlos/SP: estudo do comportamento pluviométrico a partir de dados de estações climatológicas, 1993-2014**, 24. set. 2015. text, Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-16112015-100925/>. Acesso em: 5/12/2018.

SANCHES, R. G. **Análise das chuvas diárias na região de São Carlos/SP por meio de índices climáticos e das tendências pluviométricas. Tese.** 201p. 28. jun. 2019. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-20082019-093802/>. Acesso em: 1/12/2020.

SANCHES, R. G.; NEVES, G. Z. DE F.; SANTOS, B. C. DOS; et al. Intense Rainfall in São Carlos/SP: Determination of Threshold Values Using Climate Indices and Their Spatio-Temporal Repercussion. **American Journal of Climate Change**, v. 07, p. 388, 2018.

SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C. D.; MIANI, R. S.; et al. Analysis of Daily Rainfall in São Carlos/SP, Brazil over 1979-2017 Using Laplace Trend Test. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 8, n. 7, p. 104–125, 2020. Scientific Research Publishing.

SANTOS, C. A. C. DOS; SATYAMURTY, P.; GOMES, O. M.; SILVA, L. E. M. G. DA. Variability of extreme climate indices at Rio claro, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 395–400, 2012.

SANTOS, B. C. DOS; SOUZA, P. H. DE; VECCHIA, F. A. DA S. A caracterização da precipitação do ano hidrológico de 2013-2014 na região de São Carlos/SP e sua repercussão no espaço geográfico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, n. 0, 15 set. 2017.

SANTOS, B.C.; SANCHES, R.G.; SILVA, M.S.D.; KAYANO, T.Y.K.; SOUZA, P.H.; TECH, A.R.B. Análise do efeito orográfico por meio da interpolação de índices climáticos. **Revista de Geografia-PPGEO-UFJF**, v. 8, n. 2, p. 114-132, 2018.

SANTOS, B. C. dos, FONTÃO, P. A. B., & SOUZA, P. H. de. (2020). O efeito do relevo nas chuvas na porção central do Estado de São Paulo em anos padrão extremos. **Revista Do Departamento De Geografia**, 40, 132-147.

SERRA, A.; RATISBONA, L. As massas de ar na América do Sul. **Revista Geográfica**, n.51, p. 67-129, 1942.

SOUZA, P. H. DE; SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C. DOS. ANÁLISE DAS CHUVAS NO MUNICÍPIO DE ALFENAS/MG: ÍNDICES CLIMÁTICOS E CHUVAS INTENSAS NA SÉRIE HISTÓRICA, 1984-2016. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 0, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/59775>. Acesso em: 28/3/2019.

SUGAHARA, S.; ROCHA, R. P. DA; SILVEIRA, R. Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 9, p. 1339–1349, 2009.

SUKHWANI, H.; ALONSO, J.; TRIVEDI, K. S.; MCGINNIS, I. Software Reliability Analysis of NASA Space Flight Software: A Practical Experience. 2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS). **Anais...** . p.386–397, 2016.

TEIXEIRA, M. DA S.; SATYAMURTY, P. Trends in the Frequency of Intense Precipitation Events in Southern and Southeastern Brazil during 1960–2004. **Journal of Climate**, v. 24, n. 7, p. 1913–1921, 2011.

TOTÉ, C.; PATRICIO, D.; BOOGAARD, H.; et al. Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1758–1776, 2015. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

VÁSQUEZ P., I. L.; DE ARAUJO, L. M. N.; MOLION, L. C. B.; et al. Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 3, p. 801–824, 2018.

YOULTON, C.; SHIRATSUBAKI, T.; OLIVEIRA, P. T. S. DE; WENDLAND, E. Influencia del fenómeno El Niño-La Niña y cambio climático en el patrón de lluvias en São Carlos-SP, Brasil. **Estudios Geográficos**, v. 73, n. 272, p. 325–331, 2012.

ZANDONADI, L.; ACQUAOTTA, F.; FRATIANNI, S.; ZAVATTINI, J. A. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, n. 3, p. 741–756, 2016.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.