



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO ANUAL NO NORTE DO BRASIL CONSIDERANDO OS EFEITOS DOS EVENTOS ENOS: EL NIÑO E LA NIÑA

Mariane Furtado Gonçalves ¹

* Claudio José Cavalcante Blanco ²

ESTIMATION OF ANNUAL PRECIPITATION IN NORTHERN BRAZIL CONSIDERING THE EFFECTS OF THE EVENTS ENOS: EL NIÑO AND LA NIÑA

Recibido el 11 de marzo de 2019; Aceptado el 5 de febrero 2020

Abstract

Unavailability rainfall data in Amazonia occurs due to the size of the region, which makes it more expensive the consolidation of a network of rainfall gauge stations. However, these data are important for the planning of Agriculture, water resources and public supply. In this case, an alternative is to develop models for estimating rainfall. Thus, it was analyzed a historical series of 31 years of satellite-monitored data (1960-1990), this satellite group using a suite of geostationary and polar orbiting data from NOAA, DMSP and NASA environmental satellites for an understanding of the atmosphere, ocean and air-sea interface, selecting the years with episodes of El Niño and La Niña, making two new time series. Ward's agglomerative hierarchical method was used and a Euclidean distance as a measure of similarity, with which six homogeneous rainfall regions were identified. To these regions, multiple linear regression models (MRLM) were applied for regionalization of the average annual rainfall. The models were adjusted for the complete series, considering the El Niño events and only the La Niña events; and validated with observed data from the years 1973 to 2012 of 12 rainfall stations of ANA (National Water Agency). The estimates presented different results as a function of the homogeneous region and the analyzed series, demonstrating the influence and necessity of considering the El Niño and La Niña events in the modeling approach. The mean errors between observed and estimated rainfalls did not exceed 23.6%, therefore, the adopted methodology is a good option for estimates of average annual rainfall in Pará state, Northern Brazil.

Keywords: ward method, homogeneous regions, multiple regression, ENOS, El Niño, La Niña.

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil.
Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Côrrea, Belém, Pará, Brasil.

*Autor correspondente: Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Côrrea, 1, 66075-110, Belém, Pará, Brazil. E-mail: blanco@ufpa.br

Resumo

A carência de dados pluviométricos na Amazônia ocorre devido ao tamanho da região, que encarece o adensamento de uma rede de estações pluviométricas. Entretanto, esses dados são importantes para o planejamento da Agricultura, recursos hídricos e abastecimento público. Nesse caso, uma alternativa é desenvolver modelos para estimar chuvas. Assim, foi analisada uma série histórica de 31 anos de dados (1960-1990) monitorados via satélites geoestacionários e de órbita polar da NOAA, DMSP; e satélites ambientais da NASA para obter uma compreensão fundamental da atmosfera, oceano e interface ar-mar, selecionando-se os anos com episódios de El Niño e La Niña, perfazendo duas novas séries temporais. O método hierárquico aglomerativo de Ward foi utilizado, tendo a distância Euclidiana como medida de similaridade. Com isso foram identificadas seis regiões pluviométricas homogêneas. A essas regiões foram aplicados modelos de regressão linear múltipla (MRLM) para regionalização das chuvas totais anuais. Os modelos foram ajustados para a série completa, sendo considerados os eventos de El Niño e de La Niña; e validados com dados observados dos anos de 1973 a 2012 de 12 estações pluviométricas da ANA (Agência Nacional de Água). As estimativas apresentaram diferentes resultados em função da região homogênea e das séries analisadas, demonstrando a influência e a necessidade de se considerar os eventos El Niño e La Niña no tipo de modelagem abordada. Os erros médios entre as chuvas observadas e estimadas não ultrapassaram 23.6%, portanto, a metodologia adotada é uma boa opção para estimativas de chuvas anuais médias no estado do Pará, Norte do Brasil.

Palavras chave: Método de Ward, regiões homogêneas, regressão múltipla, ENOS, El Niño e La Niña.

Introdução

Na Amazônia brasileira, há uma carência de dados de chuva devido à falta de monitoramento. Este problema é, em parte, devido ao tamanho da região, o que aumenta os custos de implantação e operacionalização da rede, bem como os custos de logística e transporte de equipes técnicas, responsáveis pelo monitoramento dos dados. Tal carência afeta muito o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, especialmente em projetos de irrigação, abastecimento público, drenagem urbana e sistemas de controle de inundações, necessários para garantir serviços essenciais à população da região. Uma alternativa a este problema é desenvolver modelos de regionalização de precipitações, aplicáveis em regiões homogêneas, que permitam a estimativa de totais pluviométricos na região. Em Hidrologia, o termo regiões homogêneas está associado às regiões que possuem semelhança hidrológica (Patil & Stieglitz, 2011; Wazneh et al., 2013, Swain et al., 2016). Essa semelhança inclui características físicas, climáticas, fatores biológicos e geológicos; e as ações humanas. A definição de regiões homogêneas é considerada a fase da regionalização com o maior grau de dificuldade, pois, muitas vezes, requer julgamento subjetivo. Entre os métodos usados para se determinar a homogeneidade de uma região, destaca-se o método de análise de agrupamento (AA) (Lyra et al., 2006; Yang et al., 2010; Lyra et al., 2014).

Uma revisão mais detalhada sobre a AA pode ser consultada em Gonçalves et al. (2016), além disso, outros estudos vêm sendo desenvolvidos no Brasil, como o trabalho de Oliveira-Júnior et al. (2017), que utilizou o algoritmo de Ward para identificar e agrupar regiões homogêneas de

chuva mensal no Estado do Tocantins, obtendo três regiões homogêneas de precipitação; assim como o estudo de Teodoro et al. (2015), o qual teve como objetivo aplicar a análise de agrupamentos usando o algoritmo de Ward e identificar os sistemas meteorológicos que afetam o regime de chuvas nos biomas do estado do Mato Grosso, em que foram identificadas cinco regiões homogêneas. Em contrapartida, outro trabalho que também objetivava identificar regiões homogêneas de chuva e estimar precipitações em locais sem monitoramento pluviométrico, foi desenvolvido por Gomes et al. (2018) na Região Hidrográfica Tocantins Araguaia (RHTA), porém com a utilização do método fuzzy c-means para identificação das regiões, que identificou três regiões homogêneas de precipitações médias mensais e anuais.

Em estudos de hidrologia para estimativa de totais pluviométricos, três métodos vêm sendo utilizados, interpolação espacial, modelos estatísticos e o híbrido entre eles. Entre estes, o último foi utilizado por Hong Wei et al. (2005) para estimar precipitações em regiões semiáridas da China. Os resultados obtidos indicaram que a precisão do método híbrido, foi superior em relação aos outros métodos utilizados, como por exemplo, os modelos estatísticos. Ranhao et al. (2008) desenvolveram um modelo de regressão linear múltipla (MRLM) para estimar chuvas nas montanhas de Daqing, China; e concluíram que o modelo é capaz de descrever 72.6% da variabilidade espacial anual da chuva. Chifurira & Chikobvu (2014) desenvolveram um MRLM para estimar chuvas anuais médias em Zimbábue. A aplicação do modelo desenvolvido teve um desempenho razoável com nível estatístico de significância de 5%, podendo ser utilizado para estimar chuva anual média com pelo menos um ano de antecedência. E no Brasil Cruz et al. (2013), obtiveram uma equação por meio de regressão linear múltipla que correlacionou valores anuais de precipitação e fatores de localização espacial para 58 postos espalhados pelo estado de Sergipe, com erros médios percentuais situados entre -7.5% a 5.5%, variando segundo as diferentes regiões climáticas presentes no estado.

Baseado no exposto, o objetivo desse trabalho é regionalizar e estimar, através de MRLM, chuvas anuais médias para regiões homogêneas com base nos eventos de El Niño e La Niña. Tais estimativas objetivam subsidiar o planejamento, por exemplo, da agricultura no estado do Pará, bem como podem ser usadas em balanços hídricos simplificados para estimativas de evapotranspiração (ET), mediante dados observados de vazão.

Material e métodos

Área de estudo e dados utilizados

A região de estudo é o Estado do Pará (PA), localizado na região Norte do Brasil, fazendo parte da Amazônia brasileira. Quase toda área é composta de floresta tropical úmida, com exceção de partes onde existem formações campestres: região do Baixo Rio Trombetas e Arquipélago de Marajó (Figura 1). Além de áreas antropizadas como, por exemplo, o sudeste (SE) do estado, onde o agronegócio, setor mineral e de produção hidrelétrica estabeleceram-se. Localizado na Zona

Equatorial, o Pará tem um clima equatorial predominantemente quente e úmido. A taxa de chuva é menor de julho a novembro. Outro tipo de clima observado no Pará é o superúmido, como mostrado no estudo de Gonçalves et al. (2016) e Ishihara et al. (2013). O Arquipélago do Marajó contém as áreas mais úmidas do Estado.

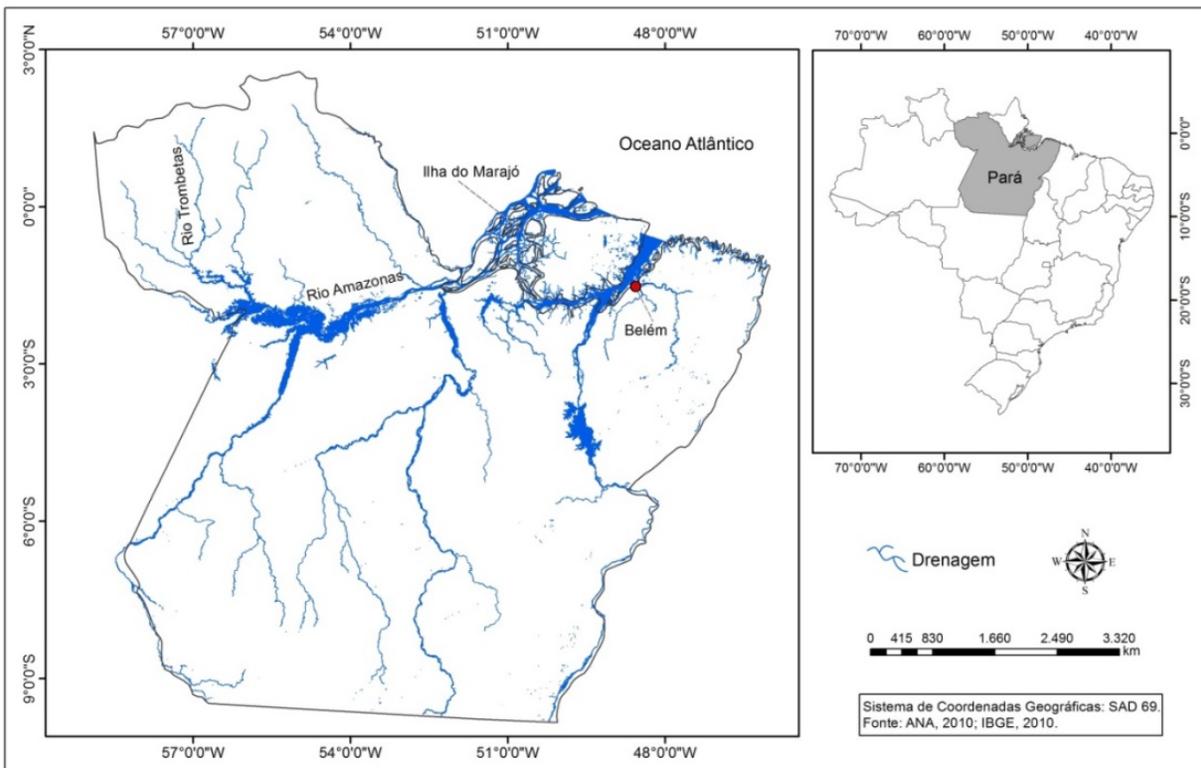


Figura 1. Área de estudo.

Foram utilizados dados de acordo com o estudo de Gonçalves et al. (2018), em que foram obtidos 413 pontos de amostragem para valores médios de chuva mensal no Estado do Pará, para série histórica com 31 anos (1960 -1990) de comprimento, os quais foram monitorados via satélites geostacionários e de órbita polar da NOAA, DMSP; e satélites ambientais da NASA para obter uma compreensão fundamental da atmosfera, oceano e interface ar-mar, selecionando-se os anos com episódios de El Niño e La Niña, perfazendo duas novas séries temporais. Os dados obtidos via satélite dos 413 pontos estão dispostos em uma grade espaçada de 0.5° por 0.5° de latitude e longitude, com a chuva mensal média para cada ponto interpolado por meio da versão esférica do algoritmo Shepard, descrito por Webber & Willmott (1998).

A localização geográfica e a chuva média mensal para os pontos estudados foram obtidos a partir do site do Centro de Pesquisa Climática da Universidade de Delaware-Newark, EUA (Webber & Willmont, 1988). Nesse caso, dois subgrupos de dados de chuva foram selecionados para os eventos de El Niño (totalizando 19 anos) e La Niña (13 anos). As informações referentes à ocorrência destes fenômenos foram obtidas no site do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Brail (INPE, 2018); e os viores de altitudes (Figura 2) foram obtidos a partir do trabalho de Miranda & Coutinho (2005).

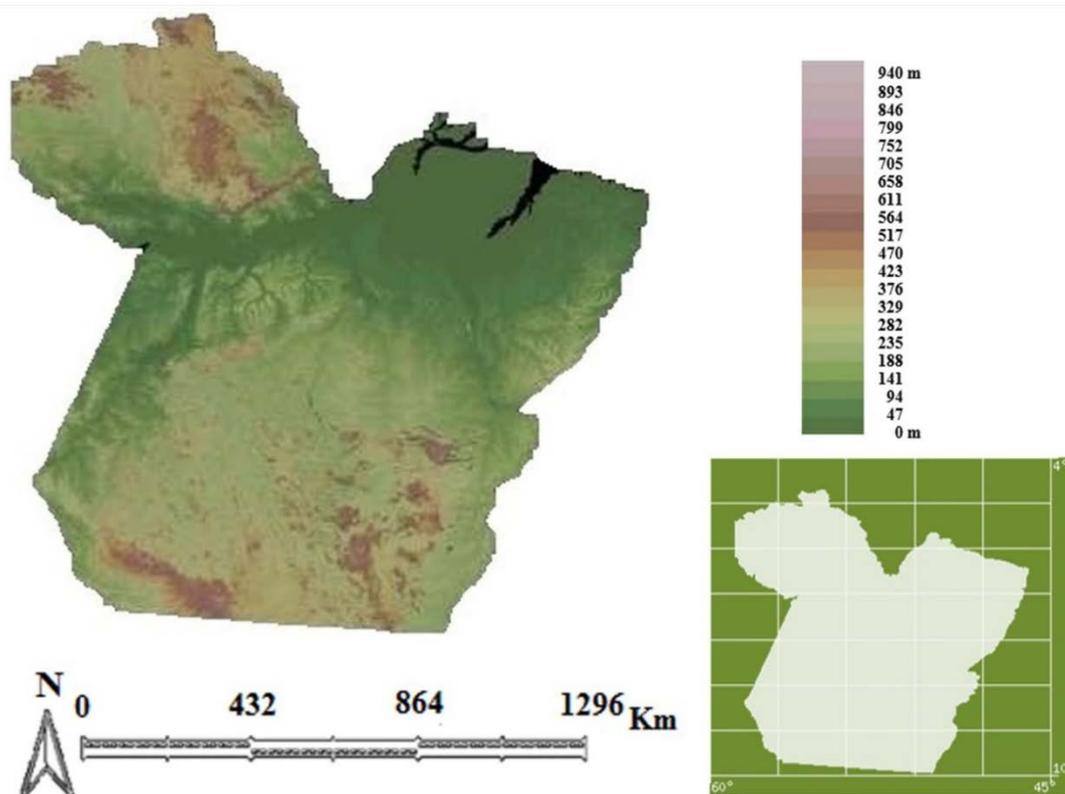


Figura 2. A hipsometria (m) do estado do Pará. Fonte adaptado de Miranda e Coutinho (2005).

Com relação à ocorrência dos eventos El Niño e La Niña, alguns indicadores foram desenvolvidos, como por exemplo, o Índice Oceânico Niño (ION) para monitoramento do ENOS, desenvolvido por Trenberth (1984), e *Multivariate ENOS Index* (MEI), implementado por Wolter e Timlin (1993) a partir de estudos com tendências climáticas. Assim, foi considerado neste trabalho o ION definido pelo *National Weather Service - Climate Prediction Center*, no qual valores negativos e positivos do ION são indicativos da ocorrência de La Niña e de El Niño, respectivamente.

Agrupamento de Ward

Para a aplicação da AA, foi utilizado o estudo de Gonçalves et al. (2016). Os autores selecionaram quatro variáveis: longitude, latitude, altitude e Chuva. A distância Euclidiana foi utilizada para se medir a similaridade entre os grupos, esta medida é uma medida comum em métodos de agrupamento (Ward, 1963). Tal medida é definida como a distância geométrica entre dois objetos i e i' tomada em um espaço com as dimensões de p (Equação 1).

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (Z_{ij} - Z_{i'j})^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que Z_{ij} é a variável padronizada do ponto i , e $Z_{i'j}$ é a variável padronizada do ponto i' .

O método de Ward foi utilizado para o agrupamento, sendo este um método de dados hierárquico que forma grupos, buscando sempre o menor erro interno entre os vetores que compõem cada grupo e o vetor médio do grupo. Este método é equivalente a buscar o menor desvio padrão entre os dados de cada grupo. Uma descrição mais detalhada do método de Ward pode ser encontrada em Gonçalves et al. (2016). A técnica AA foi aplicada para a chuva anual média em toda a série histórica (1960 - 1990) e para os eventos de El Niño e La Niña. Assim, o Estado do Pará foi dividido em grupos homogêneos, que foram determinados por cortes transversais nos dendrogramas. O nível de corte foi baseado em uma análise de sensibilidade, em que se observou o maior nível de similaridade. Após a determinação do número de grupos que se formaram com seus respectivos dados (longitude, latitude e chuva), o software Surf 9^o foi utilizado para determinação de mapas com isoietas das regiões homogêneas de chuva no Estado do Pará.

Modelos de regressão utilizados na regionalização

Após a obtenção dos mapas de regiões homogêneas de chuva, utilizou-se um MRLM para regionalização e determinação das chuvas médias anuais por região homogênea. Segundo Hair et al. (2005), modelos de regressão linear múltipla (Equação 2) são técnicas estatísticas utilizadas para analisar a relação entre uma única variável dependente (Y) e no mínimo duas variáveis independentes ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), sendo ε o termo que representa o erro de aproximação. Seu emprego tem como objetivo a utilização de variáveis independentes cujos valores são conhecidos para prever os valores da variável dependente.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + \varepsilon \quad \text{Equação (2)}$$

Assim, foi aplicada a regressão múltipla entre a variável dependente Y (Precipitação) e as variáveis independentes (Latitude -LA, Longitude -LO e Altitude -H). As constantes da regressão, a , b , c e d dos modelos estatísticos testados: Linear (Equação 3), Potência 1 (Equação 4) e Potência 2

(Equação 5), foram determinadas via método dos mínimos quadrados. Esses modelos são geralmente utilizados para estimativas de precipitações e vazões via regressão múltipla em estudos de regionalização (Hong Wei et al., 2005; Pessoa et al., 2011).

$$P = a + b \cdot LO + c \cdot LA + d \cdot H \quad \text{Equação (3)}$$

$$P = a \cdot LO^b \cdot LA^c \cdot H^d \quad \text{Equação (4)}$$

$$P = a \cdot H^b \cdot (LO/LA)^c \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo P a precipitação média anual estimada, LO ($^{\circ}$) a longitude, LA ($^{\circ}$) a latitude, H (m) a altitude, e a , b , c , d os coeficientes de regressão. O critério de desempenho utilizado para análise de regressão foi o erro relativo percentual, ϵ (%), determinado entre as chuvas observadas e estimadas (Equação 6).

$$\epsilon = \left(\frac{P_i - \hat{P}_i}{P_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo P_i a precipitação observada (mm) e \hat{P}_i a precipitação estimada (mm) pelo MRLM.

Ajuste e validação dos modelos

Aos dados observados foram ajustadas funções correspondentes aos três modelos (Equações 3-5). Os parâmetros a , b , c e d representam as informações geográficas das estações, as quais, por meio dos modelos, podem ser transferidas para locais sem dados de chuva, permitindo a estimativa dos valores de chuva.

Tabela 1. Dados das estações pluviométricas para validação dos modelos de regionalização.

Cod. ANA	ID	Estações	Coordenadas Geográficas		Altitude (m)	Período da série	Comprimento da série (anos)		
			Lat. ($^{\circ}$)	Long. ($^{\circ}$)			TA	EN	LN
815400	01	Apalai	54.66	1.220	376	1990-2010	21	16	8
156000	02	Vista Alegre – conj.2	56.05	1.130	15	1994-2004	11	7	6
255001	03	Cachoeira do Aruá	55.72	2.651	47	1998-2009	12	8	6
254005	04	Barragem Conj. 4	54.30	2.815	47	1978-2002	25	17	11
454000	05	Monte Alegre do Xingu	52.72	4.674	188	1991-2002	12	8	6
651003	06	São Felix do Xingu	50.03	5.370	206	1990-2012	23	18	8
649001	07	Faz. Santa Elisa	49.55	6.795	210	1985-2007	23	17	8
750000	08	Faz. Cumarú do Norte	50.83	7.826	329	1996-2001	6	2	5
247004	09	Faz. São Raimundo	47.53	2.426	90	1999-2010	12	8	5
248006	10	PA-256	48.25	2.421	47	1991-2012	22	15	8
146010	11	Emborai	46.58	1.292	47	1985-2007	23	17	10
148003	12	Santa Isabel	48.17	1.297	15	1973-2010	38	27	17

Legenda: TA: Todos os anos; EN: Anos de El Niño; LN: Anos de La Niña.

Os modelos ajustados com os melhores desempenhos por região homogênea e por série considerada (série completa, somente eventos de El Niño e somente eventos de La Niña) foram utilizados na etapa de validação. Essa etapa foi elaborada com dados pluviométricos observados dos anos entre 1973 e 2012 de 12 estações pluviométricas do banco de dados da Agência Nacional de Água (ANA, 2018). Além desses dados, também foram obtidos dados de longitude, latitude e altitude. Para estações sem dados de altitude, foi utilizado o mapa de altitude do estado do Pará (Figura 2). Os dados estão resumidos na Tabela 1. Assim, utilizando-se os modelos ajustados e os valores dos coeficientes de regressão (a , b , c e d), foram determinados os totais de chuvas anuais médios estimados, os quais foram comparados aos valores observados de chuvas das 12 estações consideradas. Na Figura 3 é apresentado o resumo da metodologia utilizada.

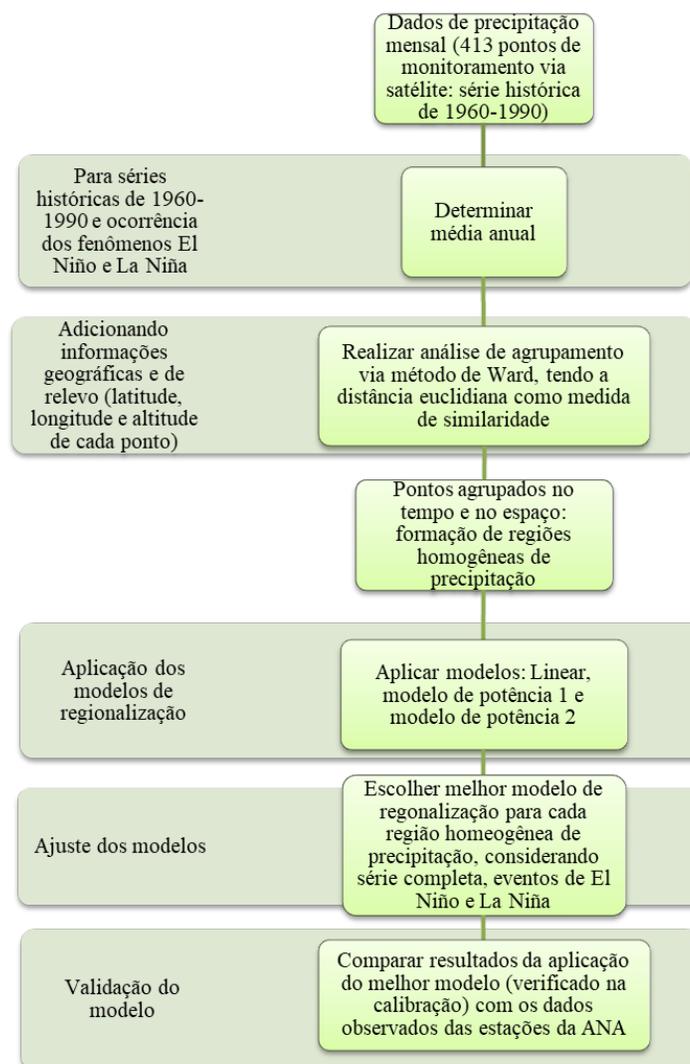


Figura 3. Ilustração do processo operacional da metodologia.

Resultados e discussão

Os resultados da seleção da série histórica e da análise de agrupamento de Ward, foram obtidos a partir do trabalho de Gonçalves et al. (2016), portanto, a técnica de AA foi aplicada a valores de precipitação anual média dos 413 pontos de monitoramento, considerando uma série histórica de 31 anos, e dentre a série histórica completa, selecionou-se os anos que ocorreram eventos de El Niño e La Niña, sendo estes:

- Todos os anos - série histórica de 1960 a 1990;
- Anos com El Niño - série histórica utilizando dados de 1963, 1965, 1966, 1968, 1969, 1970, 1972, 1973, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1982, 1983, 1986, 1987, 1988 e 1990; e
- Anos com La Niña - série histórica utilizando dados de 1964, 1965, 1970, 1971, 1973, 1974, 1975, 1976 1983, 1984, 1985, 1988 e 1989.

Na Tabela 2 é apresentada a caracterização estatística dos dados. Nela pode-se observar as médias das precipitações anuais dos 413 pontos no estado (tanto para a série histórica completa, como para os anos com eventos niños), assim como a variação desta média, representada pelo desvio padrão. Diante disso, observa-se nesta tabela que no estado do Pará as médias anuais para todos os anos da série histórica não excederam a 3111 mm/ano, essa variação de média resultou em valores de desvio padrão elevados, o que pode significar que houve uma ampla variação nas médias anuais de precipitação no estado. Já quando se selecionou os anos com ocorrência de El Niño essa média não excedeu a 2362 mm/ano, e em anos com eventos de La Niña, os valores das médias anuais foram abaixo de 2581 mm/ano.

Tabela 2. Caracterização estatística dos 413 pontos de amostragem de chuva, segundo o período total e os anos de El Niño e La Niña.

Pontos	Todos os Anos			Anos de El Niño			Anos de La Niña		
	Varição das chuvas (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Varição das chuvas (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Varição das chuvas (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão
C_1 a C_49	1893 – 2896	2165	190	1871 – 2828	2138	188	1909 – 2896	2217	204
C_50 a C_99	2004 – 3111	2428	308	1935 – 2970	2362	278	2163 – 3111	2568	335
C_100 a C_149	1916 – 2833	2397	256	1816 – 2707	2297	242	2064 – 2833	2581	263
C_150 a C_199	1956 – 2588	2204	189	1841 – 2501	2093	183	2141 – 2588	2428	197
C_200 a C_249	1561 – 2263	1990	140	1445 – 2188	1906	149	1616 – 2263	2163	154
C_250 a C_299	1554 – 2470	2038	218	1450 – 2394	1970	229	1645 – 2470	2173	194
C_300 a C_349	1612 – 2434	2068	274	1522 – 2395	2017	263	1726 – 2481	2147	240
C_350 a C_399	1752 – 2434	2066	238	1670 – 2327	2022	221	1817 – 2434	2133	218
C_400 a C_413	1813 – 2255	1933	154	1804 – 2217	1935	148	1848 – 2255	1977	150

Agrupamento de Ward

A partir das precipitações médias anuais dos 413 pontos, foi elaborado o dendograma e realizada a análise de sensibilidade para a determinação do número de regiões de chuvas formadas por pontos similares, tendo o eixo dos x os pontos de amostragem que foram agrupados de acordo com a sua semelhança; e o eixo dos y, a distância euclidiana, distância que mede a similaridade entre os grupos (Figura 4) para cada série histórica (Figura 4-a-b-c). Assim, considerou-se a formação de seis regiões homogêneas no Pará. Este trabalho difere do estudo de Teodoro et al. (2015) e Oliveira- Júnior et al. (2017), que também utilizaram o método de agrupamento via Ward para determinação de regiões homogêneas, e encontraram cinco e três regiões homogêneas para os estados de Mato Grosso e Tocantins, respectivamente. E também do estudo realizado por Gomes et al. (2018), na Região Hidrográfica Tocantins Araguaia (RHTA) no estado do Pará, o qual aplicaram o método fuzzy c-means para determinação de regiões homogêneas de precipitação mensal, que resultou em três regiões homogêneas. Esta AA para o estado do Pará também pode ser observada em Gonçalves et al. (2016).

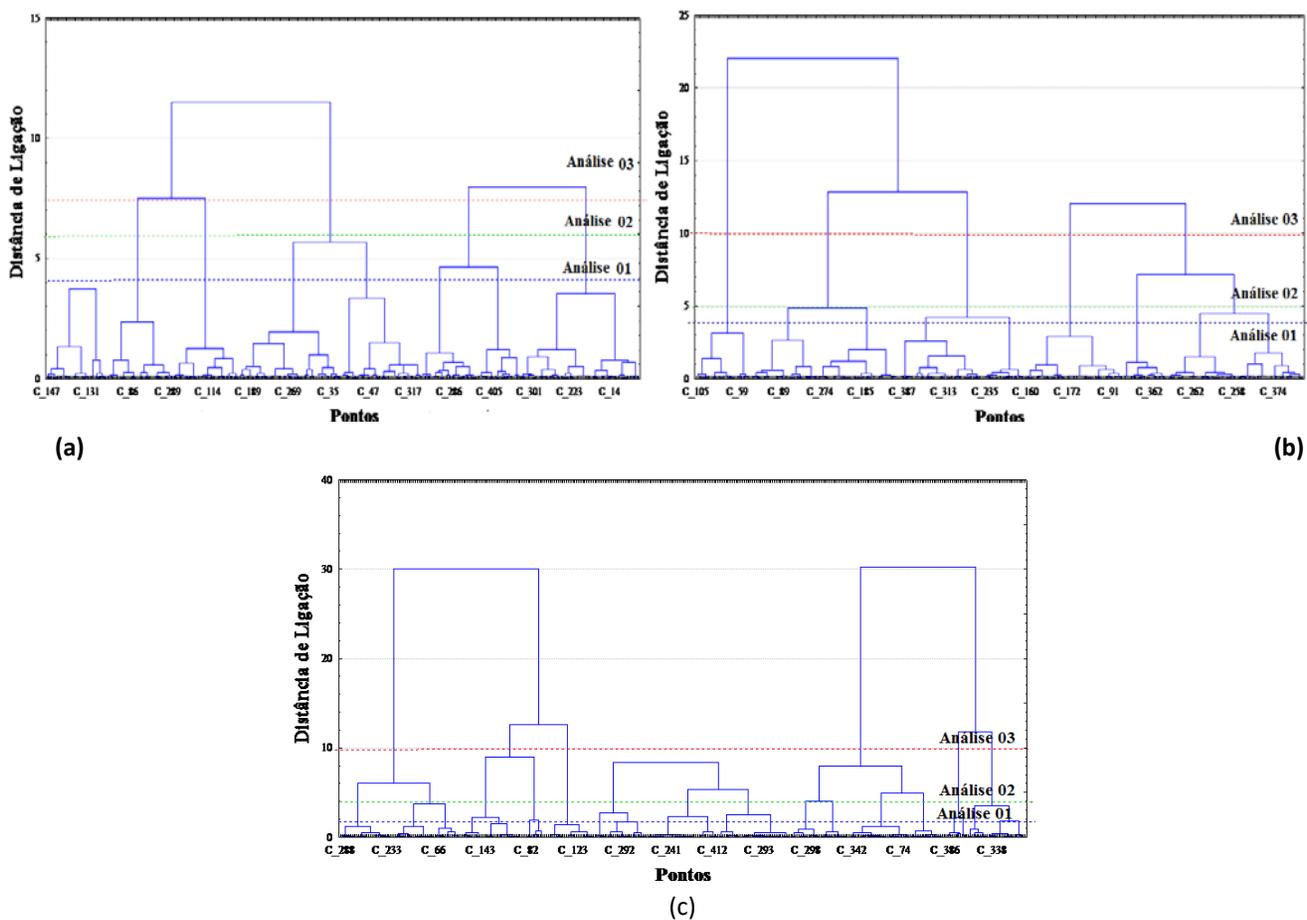


Figura 4. Dendrogramas para série completa (a), El Niño (b) e La Niña (c).

Na Figura 5 estão mostrados os resultados da AA dos totais anuais de chuva, em que se pode observar as seis regiões homogêneas, sendo a região representada pela letra “A”, a região onde ocorre menor índice pluviométrico e a região representada pela letra “F” a com maior índice pluviométrico. Os maiores totais de chuva ocorreram na porção Nordeste do Estado (Região F), com valores máximos, em anos de La Niña (Figura 5c). Já os menores totais anuais foram encontrados em anos de El Niño (Figura 5b). Vale ressaltar que há uma tendência de ocorrência de anos úmidos, quando ocorrem eventos de La Niña. Diferentemente de anos com ocorrência de El Niño, os quais tendem a ser anos menos úmidos. Ainda na Figura 5, estão apresentadas as localizações das 12 (doze) estações pluviométricas utilizadas para validação dos modelos de regionalização.

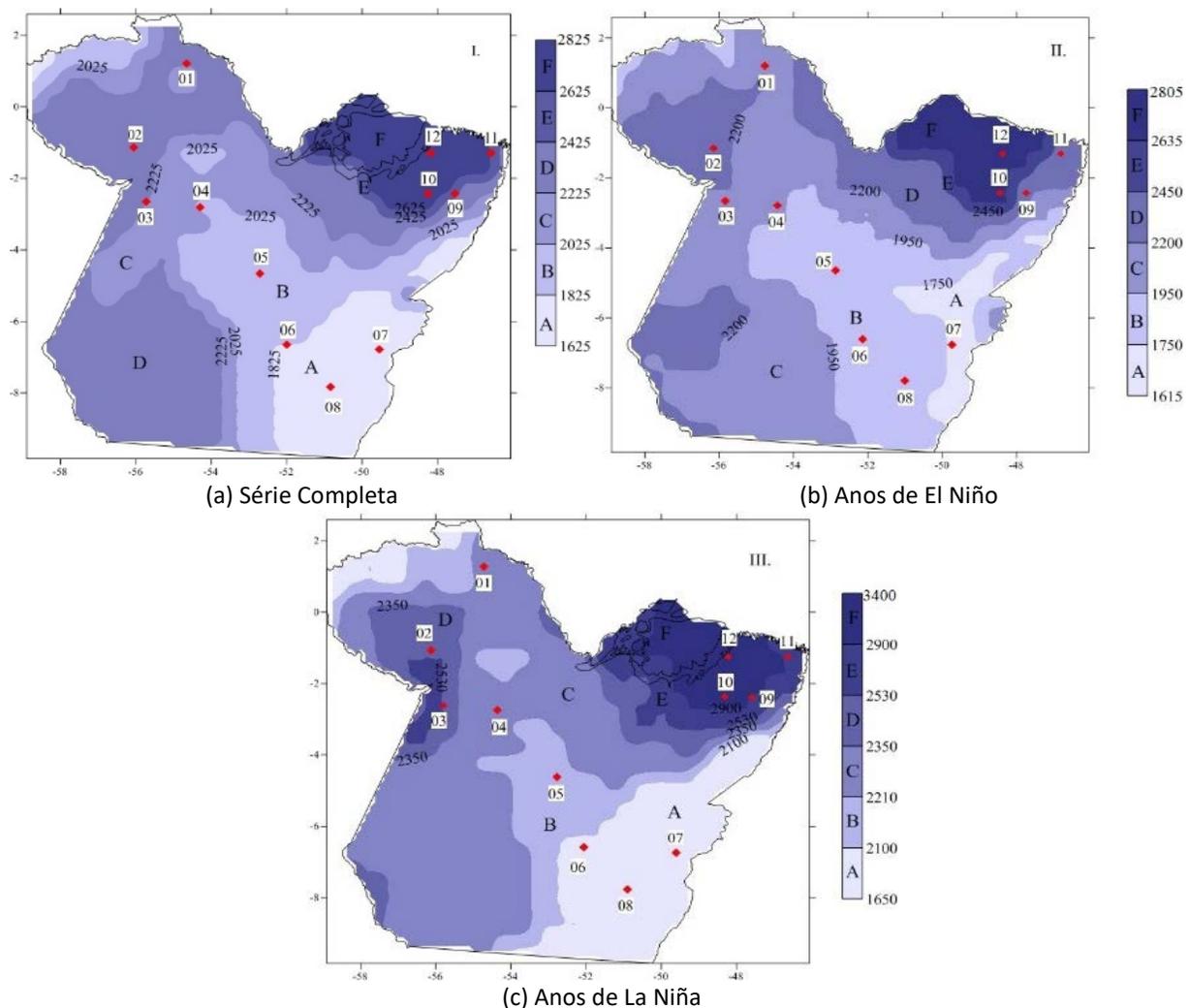


Figura 5. Distribuição espacial das regiões pluviométricas homogêneas no Estado do Pará e localizações das estações pluviométricas para validação dos modelos.

Ajuste dos modelos

Para determinação do melhor modelo a ser utilizado na validação da metodologia, na Tabela 3 estão exibidas as médias do erro relativo percentual (€%) por região homogênea dos totais anuais de chuva, o qual utilizou o MRLM. Assim, considerando-se a série completa e La Niña, observa-se que o modelo de melhor desempenho foi o modelo linear. Já para a série de El Niño o modelo que melhor estimou as chuvas foi o modelo de potência 1.

Tabela 3. Média do erro relativo percentual entre as precipitações observadas e simuladas para as séries analisadas por região homogênea.

Regiões	Todos os anos			Anos de El Niño			Anos de La Niña		
	Potência 1	Potência 2	Linear	Potência 1	Potência 2	Linear	Potência 1	Potência 2	Linear
A	2.78	5.29	3.07	2.40	4.90	2.81	2.15	2.47	2.21
B	2.23	3.15	2.19	3.16	3.19	3.16	3.24	5.74	3.07
C	2.25	2.44	2.17	3.38	8.30	3.00	2.90	2.94	2.87
D	3.38	7.25	2.9	4.58	5.63	4.7	2.26	2.33	2.26
E	1.64	15.7	1.72	2.35	7.81	2.4	2.40	5.90	2.38
F	1.84	5.69	1.84	1.68	9.89	1.71	2.53	8.20	2.63
Média	2.35	6.58	2.31	2.93	6.62	2.96	2.58	4.6	2.57

Diante disso, pode-se observar na Tabela 4, as equações determinadas para simulação de precipitação para cada região encontrada, e foram utilizados os modelos que obtiveram o melhor ajuste para a série completa, El Niño e La Niña. A longitude (LO), a latitude (LA) e a altitude (H) do local foram as variáveis consideradas nas equações.

Tabela 4. Modelos para estimativa de precipitação em função da série de dados e da região homogênea.

Regiões	Todos os anos	El Niño	La Niña
	Modelo Linear	Modelo de Potência 1	Modelo Linear
PA=	$4764.37 - 37.54.LO - 155.75.LA$	$2653.52.LO^{-0.041}.LA^{0.002}.H^{0.0002}$	$2906.83 - 7.33.LO + 7.42.LA - 0.1.H$
PB=	$2565.7 - 3.65.LO - 4.13.LA - 0.74.H$	$21206.LO^{-0.54}.LA^{-0.054}$	$6093.14 - 60.31.LO - 175.81.LA$
PC=	$1988.04 + 1.89.LO - 4.76.LA + 0.36.H$	$61.18.LO^{0.866}.LA^{0.018}.H^{0.011}$	$2296.98 - 0.076.LO + 0.59.LA - 0.3.H$
PD=	$1491.48 + 14.1.LO + 13.6.LA - 0.31.H$	$87.01.LO^{0.823}.LA^{0.102}.H^{0.007}$	$1657.58 + 12.4.LO + 0.1.LA - 0.03.H$
PE=	$-35.5 + 34.37.LO + 13.31.LA - 0.03.H$	$75.2.LO^{0.822}.LA^{-0.01}.H^{0.0001}$	$1876.14 - 3.6.LO - 3.61.LA + 0.14.H$
PF=	$1364.59 + 11.04.LO - 1.04.LA + 0.13.H$	$3.44.LO^{1.58}.LA^{-0.005}.H^{0.007}$	$556.82 + 25.81.LO + 6.07.LA - 0.075.H$

Validação dos modelos

Com base na Tabela 4, foram determinadas as chuvas totais anuais mediante às informações obtidas na Tabela 1 e na Figura 5. Assim, para série completa, os erros relativos percentuais (Equação 6) foram obtidos entre as chuvas totais anuais observadas (P_o) e simuladas (P_s) pelo modelo linear. O maior $\epsilon\%$ foi observado na estação Monte Alegre do Xingu – Região B com 39,2%, devido à maior divergência entre o valor de chuva observado (1591 mm) e o simulado pelo modelo, que foi de 2214 mm. Já o menor $\epsilon\%$ foi observado na estação Cachoeira do Aruá – Região C (0,20%), devido à aproximação entre a chuva observada (2094 mm) e a simulada (2098 mm) (Figura 6).

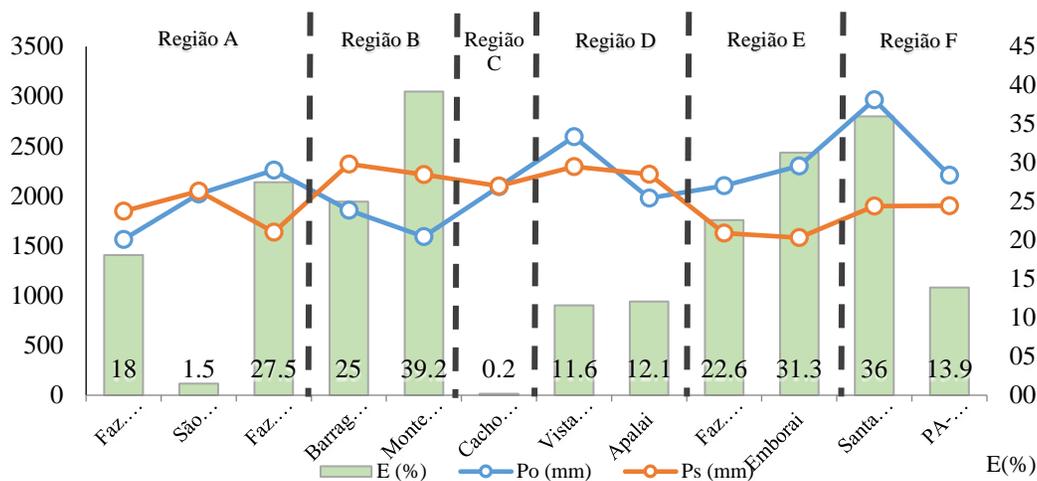


Figura 6. Erros relativos percentuais entre as precipitações observadas e simuladas por estação para série completa.

Considerando a série relativa aos eventos de El Niño (Figura 7), ressaltando que nesse caso as precipitações foram simuladas com o modelo de potência 1, observou-se que o maior $\epsilon\%$ foi de 50,8% também na Estação Monte Alegre do Xingu – Região B. Isso pode ser devido ao curto período da série histórica desta estação (sete anos de dados). Já o menor erro percentual foi de 1,70% (Estação Emborai – Região D), apresentado valor de chuva simulada de 2110 mm e chuva observada de 2075 mm.

Na Figura 8 estão mostrados os valores de chuva para a série com eventos de La Niña, assim se observou um menor erro 2,34% (Estação Apalai – Região C) e o erro máximo de 55,9% (Estação Fazenda Santa Elisa – Região A). Nesse caso, as precipitações foram simuladas com o modelo linear. Estes valores mais elevados dos erros percentuais podem ser devido à diminuição do comprimento da série histórica, pois, nesse caso, são apenas considerados anos com eventos de La Niña.

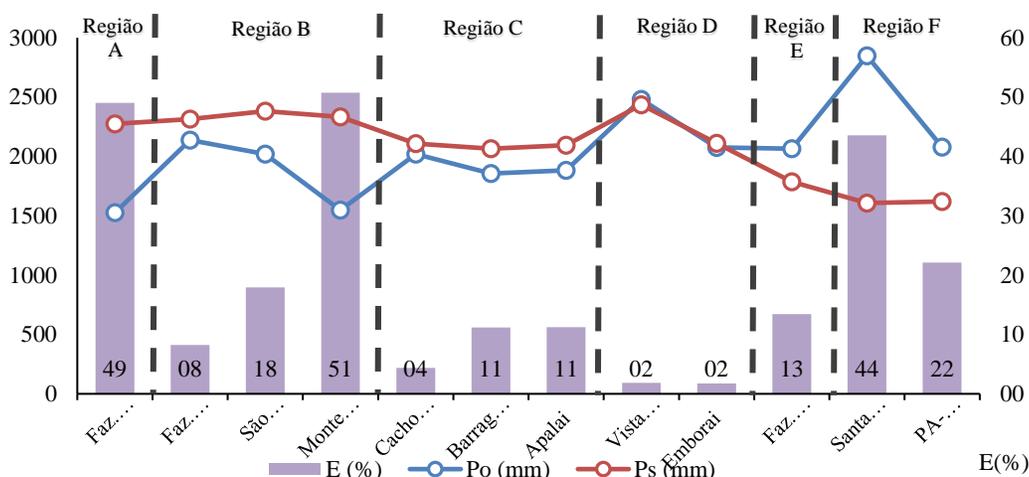


Figura 7. Erros relativos percentuais entre as precipitações observadas e simuladas por estação para anos de El Niño.

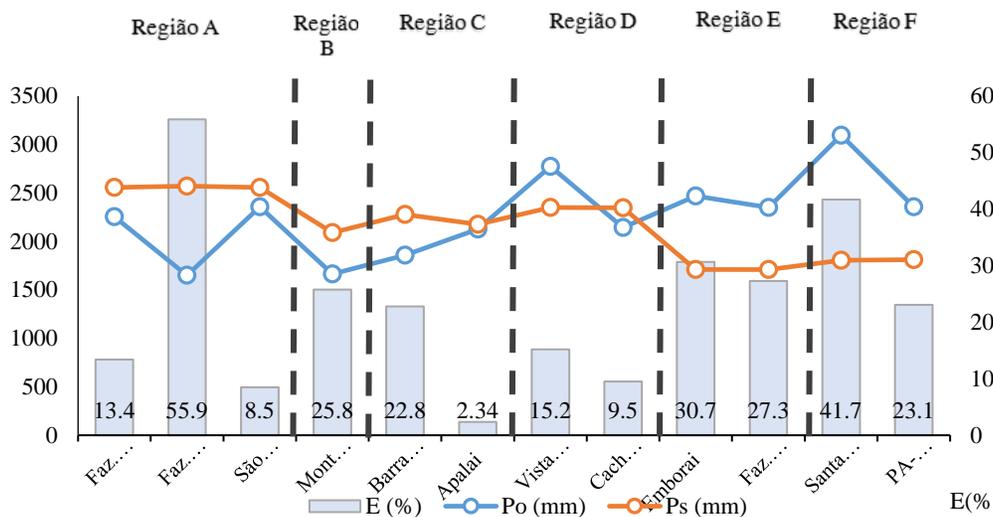


Figura 8. Erros relativos percentuais entre as precipitações observadas e simuladas por estação para anos de La Niña.

Considerando as Figuras 6, 7 e 8, os erros relativos percentuais médios determinados entre as precipitações observadas e simuladas, de modo geral, não ultrapassaram 23,6%, demonstrando que a metodologia é uma opção para estimativas de precipitações anuais médias em locais desprovidos de dados observados.

Conclusão

As estimativas das chuvas totais anuais determinadas por meio dos modelos de regionalização (ajustados e validados) apresentaram resultados distintos em função da região homogênea e da série analisada, demonstrando a influência dos eventos El Niño e La Niña e a necessidade de considerá-los em estudos que sejam influenciados por modos de variabilidade climática. O modelo de melhor desempenho, considerando-se série completa e anos de eventos de La Niña para todas as regiões, foi o modelo linear. No caso da série de El Niño para todas as regiões, o modelo que melhor se ajustou foi o modelo de potência 1. Na etapa de validação, os erros relativos percentuais médios determinados entre as chuvas observadas e simuladas não ultrapassaram 23.6%, isso mostra que a metodologia adotada é uma opção para estimativas de chuvas anuais médias em locais desprovidos de dados observados, como por exemplo, o estado do Pará.

Agradecimentos

Agradece-se à CAPES pelo financiamento de uma bolsa de doutorado e ao CNPq pelo financiamento de uma bolsa de produtividade em pesquisa (processo: 304936/2015-4).

Referências

- ANA, Agência Nacional de Águas (2018) Dados de pluviométricos. Acessado em: Fevereiro de 2018. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>
- Chifurira, R., Chikobvu, D. (2014) A Weighted Multiple Regression Model to Predict Rainfall Patterns: Principal Component Analysis Approach. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, **5**(7), 34-42.
- Cruz, M. A. S., Souza, L. A., Aragão, R., Silva, A R. S., Mota P. V. M. (2013) Aplicação de Regressão Linear Múltipla para Estimativa da Precipitação Média Anual Considerando a variabilidade espacial no estado de Sergipe. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves-RS.
- Gomes, E. P., Blanco, C. J. C., Pessoa, F. C. L. (2018) Regionalização de precipitação com determinação de regiões homogêneas via agrupamento fuzzy c-means. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **23**, e51.
- Gonçalves, M. F., Blanco, C. J. C., Dos Santos, V. C., Oliveira, L. L. S., Pessoa, F. C. L. (2016) Identification of Rainfall Homogenous Regions taking into account El Niño and La Niña and Rainfall Decrease in the state of Pará, Brazilian Amazon. *Acta Scientiarum*, **35**(2), 237-245.
- Gonçalves, M. F., Blanco, C. J. C., Dos Santos, V. C., Oliveira, L. L. S. (2018) Homogenous regions and rainfall probability models considering El Niño and La Niña in the State of Pará in the Amazon. *Acta Scientiarum. Technology*, **40**, e37742.
- Hair Jr., J. F., Anderson, R. E, Tatham, R.L., Black, W. C. (2005) Análise Multivariada de Dados. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 593 pp.
- Hong, W., Jian-Long, L., Tian-Gang, L. (2005). Study on the estimation of precipitation resources for rainwater harvesting agriculture in semi-arid land of China. *Agricultural Water Management*, **71**, 33–45.
- Ishihara, J. H., Fernandes, L. L., Duarte, A. A. A. M., Loreiro, G. E. (2013) Avaliação do Monitoramento Pluviométrico da Amazônia Legal. *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, **10**(3), 132-144.
- Lyra, G. B, Garcia, B. I. L, Piedade, S. M. S, Sediya, G. C, Sentelhas, P.C. (2006) Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade de precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **41**(2), 205-215.

- Lyra, G. B., Oliveira-Júnior, J. F., Zeri, M. (2014) Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. *International Journal of Climatology*, **34**, 3546–3558.
- Miranda, E. E. de; (Coord.). Brazil in relief (in Portuguese). (2005) Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Acessado em: Maio de 2013. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>
- Oliveira-Júnior, J F., Xavier, F. M. G., Teodoro, P. E., Goes, G., Delgado, R. C. (2017) Cluster Analysis Identified Rainfall Homogeneous Regions in Tocantins State, Brazil. *Bioscience Journal (Online)*, **33**, 333-340.
- Patil, S., Stieglitz, M. (2011) Hydrologic similarity among catchments under variable flow conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, **15**, 989–997.
- Pessoa, F. C. L., Blanco, C. J. C., Martins, J. R. (2011) Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões da Região da Calha Norte no Estado do Pará. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **16**, 65-74.
- Ranhao, S., Baiping, Z., Jing, T. (2008) A Multivariate Regression Model for Predicting Precipitation in the Daqing Mountains. *Mountain Research and Development*, **28**(3), 318-325.
- Swain, J. B., Sahoo, M. M., Patra, K. C. (2016) Homogeneous region determination using linear and nonlinear techniques. *Physical Geography*, **37**(5), 361-384.
- Teodoro, P. E., Oliveira-júnior, J. F., CUNHA, E. R., Correa, C. C. G., Torres, F. E., Bacani, V. M., Gois, G., Ribeiro, L. P. (2015) Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Mato Grosso do Sul State, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **128**, 197-209.
- Trenberth, K. E. (1984) Signal Versus Noise in the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, **112**, 326-332.
- Ward, J. H. (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal American statistical association*, **58**, 236-244.
- Wazneh, H., Chebana, F., Ouarda, T. B. M. J. (2013) Depth-based regional index-flood model. *Water Resource Research*, **49**, 7957–7972.
- Webber, S. R., Willmont, C. J. (1988) South American Precipitation: 1960-1990 Gridded Monthly Time Series (Version 1.02). Newark, Delaware: Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware.
- Wolter, K., Timlin, M. S. (1993) Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop*, 52–57.
- Yang, T., Shao, Q., Hao, Z., Chen, X., Zhang, Z., Xu, C., Sun, L. (2010) Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. *Journal of Hydrology*, **380**, 386–405.