Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

OBTENÇÃO DO INDEX-FLOOD PARA REGIÕES HOMOGÊNEAS DE MINAS GERAIS

Obtaining the Index-Flood for homogeneous regions of Minas Gerais, Brazil

Obtención del "Index-Flood" para las regiones homogéneas de Minas Gerais, Brasil

Italoema Pinheiro Bello
Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras
italoemapb@hotmail.com

Luiz Fernando Coutinho de Oliveira
Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras
coutinho@ufla.br

Gabriela Rezende Souza
Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras
rezendesgabriela@gmail.com

Flavia Vilela Corrêa
Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras
flavia-vilela-correa@hotmail.com

Alice Raquel Caminha
Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras
alicercaminha@gmail.com

Marcelo Vieira da Silva Filho
Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Lavras
marcelo.filho@ufla.br

Resumo: A importância de avaliar as precipitações intensas é devido à sua frequente utilização no dimensionamento de obras hidráulicas. Existem dificultadores relacionados à disposição de informações locais de precipitação, tornando necessária a utilização de técnicas de regionalização de chuvas intensas. Uma delas é a técnica conhecida como "Index-Flood" que visa uniformizar dados obtidos em pontos distintos de uma região considerada homogênea, para utilizá-los como um conjunto amostral único. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi separar o estado de Minas Gerais em regiões hidrologicamente homogêneas e obter seus respectivos "Index-Flood" em função dos tempos de retorno e duração para contribuir na estimativa das chuvas de projeto. Foram utilizados dados de precipitação máxima diária anual e total anual referentes à 494 estações pluviométricas localizadas em Minas Gerais. Para a separação das regiões homogêneas utilizou-se a análise de agrupamentos k-médias, gerando um total de três grupos no estado. Para cada grupo foram geradas as relações IDF regionais, que relacionadas aos valores de intensidade de precipitação para diversos tempos de duração resultaram no "Index-Flood". Posteriormente, foram obtidas as equações regionais de variável dependente, que associadas ao "Index-Flood" e o valor de precipitação local possibilitam a obtenção da chuva de projeto local utilizada para os dimensionamentos hidráulicos. Para todos os ajustes realizados, utilizou-se o coeficiente de determinação para avaliar a precisão das estimativas, sendo que, para todos os ajustes os valores de r^2 foram próximos a 1,0, indicando um bom ajuste dos dados permitindo que as equações geradas possam ser usadas na estimativa das chuvas de projetos.
Palavras-chave: k-médias. Regionalização de chuvas. Análise de cluster.

Abstract: The evaluation of heavy rainfall is important because rainfall data are frequently used to design storm drainage and erosion control systems in agricultural areas. Because it is difficult to obtain local rainfall data, heavy rainfall regionalization techniques are necessary. One such technique is known as the index-flood method, which standardizes data obtained for different areas within a region considered homogeneous to use as a single sample set. The objectives of this study were to divide the state of Minas Gerais, Brazil, into hydrologically homogeneous regions and to use the return periods and duration to obtain the respective Index-Flood values for each state to aid the design rainfall estimation. Maximum annual rainfall and total annual rainfall data from 494 weather stations in Minas Gerais were used. K-means cluster analysis was used to identify homogeneous regions and generated a total of three groups in the state. For each group, the regional intensity–duration–frequency (IDF) relationships were generated and were related to the rainfall intensity values associated with different durations, resulting in the Index-Flood value. Subsequently, the regional dependent variable equations were obtained and were associated with the Index-Flood and the local rainfall value to obtain the local design rainfall used in the design storm drainage and erosion control systems in agricultural areas. The coefficient of determination was used to evaluate the accuracy of the estimates, and the r^2 values were close to 1.0 for all fittings, which indicated a good fit of the data and allowed the equations generated to be used in the design rainfall estimation.
Keywords: IDF relationship. Intense rainfall. Rainfall regionalization. Cluster analysis.

Resumen: La importancia de evaluar las lluvias intensas se debe a su uso frecuente en el diseño de obras hidráulicas. Existen obstáculos relacionados con la disponibilidad de las informaciónes de la precipitación local, siendo necesario el uso de técnicas de regionalización de las lluvias intensas. Una de ellas es la técnica conocida como "Index-Flood" que tiene como objetivo estandarizar los datos obtenidos en diferentes puntos de una región considerada homogénea, para ursarlos como un conjunto único de muestras. De esta forma, el objetivo de este artículo fue separar el estado de Minas Gerais en regiones hidrológicamente homogéneas y obtener sus respectivos "Index-Flood" en función de los períodos de retorno y duración para contribuir a la estimación de las lluvias de diseño. Fueron utilizados datos de precipitación máxima diaria anual y total anual refiriéndose a las 494 estaciones pluviométricas ubicadas en Minas Gerais. Para la separación de las regiones homogéneas se utilizó el método de k-means, generando un total de tres grupos en el estado. Para cada grupo, se construyeron las curvas IDF regionales, que relacionadas con los valores de intensidad de precipitación para diferentes tiempos de duración dieron como resultado el "Index-Flood". Posteriormente

se obtuvieron las ecuaciones regionales de la variable dependiente, que asociado al “Index-Flood” y el valor de la precipitación local, se permite obtener la lluvia del diseño local para los dimensionamientos hidráulicos. Para todos los ajustes realizados, el coeficiente de determinación se utilizó para evaluar la precisión de las estimaciones, siendo que, para todos los ajustes, los valores de r^2 fueron cercanos a 1,0, indicando un bueno ajuste de los datos permitiendo que las ecuaciones construidas se utilicen en la estimación de las lluvias de diseño.
Palabras clave: k-means. Regionalización de lluvias. Análisis de Conglomerados.

Submetido em: 21/11/2021
Aceito para publicação em: 21/09/2022
Publicado em: 17/11/2022

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da precipitação intensa é uma etapa importante para a análise de risco hidrológico. Seu estudo é um dos principais focos em estudos de Hidrologia teórica e aplicada, uma vez que as características das chuvas são frequentemente utilizadas para projetar infraestruturas de gerenciamento de água e mitigação de riscos de inundação (MELLO e VIOLA, 2013; GHANMI, BARGAOUI e MALLET, 2016).

A frequência de ocorrência dos eventos extremos tem aumentado, tornando necessário conhecer sua distribuição espacial e temporal para reduzir a vulnerabilidade de desastres ocasionados pelas cheias (MIRHOSSEINI, SRIVASTAVA e STEFANOVA, 2013; UPADHYAYA e RAMSANKARAN, 2014; SINGH; LO e XIAOSHENG, 2017).

O conhecimento da distribuição da precipitação dentro de regiões que subdividem uma área maior é um fator importante, já que os aspectos físicos e climáticos variam conforme posição geográfica e características intrínsecas ao local, sendo estabelecidas, então, as regiões hidrologicamente homogêneas (BESKOW *et al.*, 2016; MIRANDA, 2016). Para distingui-las são utilizadas técnicas estatísticas de homogeneização que captam as características semelhantes e peculiares de cada localidade obtendo um padrão de similaridade regionalizado das chuvas (FREITAS *et al.*, 2013; SINGH; LO e XIAOSHENG, 2017).

Dentro da estatística uma das técnicas mais aplicadas para identificar regiões hidrologicamente homogêneas é a análise de agrupamentos (cluster analysis) utilizada nos trabalhos de Farsadnia *et al.* (2014), Beskow *et al.* (2016), Miranda (2016), Singh, Lo e Xiaosheng (2017).

Segundo Manly (2008), os algoritmos da análise de agrupamentos subdividem-se em métodos Hierárquicos e Não Hierárquicos. Dentre os Não Hierárquicos, o algoritmo “k-means” (MACQUEEN, 1967) ou k-médias se destaca como um dos mais populares e conhecidos devido ao seu baixo tempo de execução, sua eficiência para um grande conjunto de dados com atributos numéricos e implementação e interpretação simples, uma vez que não estão envolvidos parâmetros (YIN *et al.*, 2016; AGARWAL *et al.*, 2016).

O algoritmo classifica os objetos baseando-se na segregação dos dados em X grupos por meio da minimização da soma dos quadrados de distâncias entre os dados e o centroide

do grupo correspondente representado pela média de vetores do grupo (FARSADNIA *et al.*, 2014; GOYAL e GUPTA, 2014).

Porém, mesmo se conhecendo uma região homogênea, pode haver um limitante relacionado as localidades que não dispõem de séries históricas de precipitação, existindo então, a necessidade de alternativas para desenvolver métodos de regionalização (BACK *et al.*, 2011).

Naghettini e Pinto (2007) citam três tipos de procedimentos de análise regional: métodos que regionalizam os quantis associados a um risco específico, métodos que regionalizam os parâmetros das distribuições de probabilidades e métodos que regionalizam uma curva de quantis adimensionais, denominados "Index-Flood" ou cheia-índice.

O "Index-Flood" (IF) visa uniformizar dados obtidos em pontos distintos de uma região considerada homogênea, para utilizá-los como um conjunto amostral único (CALEGARIO, 2014; NAGHETTINI e PINTO, 2007). O fator primordial do método é que os pontos de observação constituem uma região estatisticamente homogênea e suas distribuições de probabilidade são idênticas, exceto por um fator de escala local denominado fator de adimensionalização (BASU e SRINIVAS, 2016; GADO e NGUYEN, 2016).

A metodologia inicial do IF foi introduzida por Dalrymple (1960) e depois Hosking e Wallis (1997) propuseram a aplicação do método de estimativa de parâmetros momentos-L (MML) ao IF (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

O IF é muito utilizado para vazão por meio da regionalização de cheias, mas vem sendo aplicado também para chuvas como nos estudos de Yin *et al.* (2016) e Basu e Srinivas (2016). No Brasil, o principal estudo a utilizar o IF para o caso de chuvas intensas é o de Davis, Naghettini e Pinto (2000) para o estado do Rio de Janeiro, mas também existem outros como Dantas e Pinto (2011) para a bacia do rio São Francisco.

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho segregar o estado de Minas Gerais em regiões hidrologicamente homogêneas quanto à precipitação máxima anual e obter os respectivos "Index-Flood" para cada região determinada em função dos tempos de retorno e duração para contribuir na estimativa das chuvas de projeto.

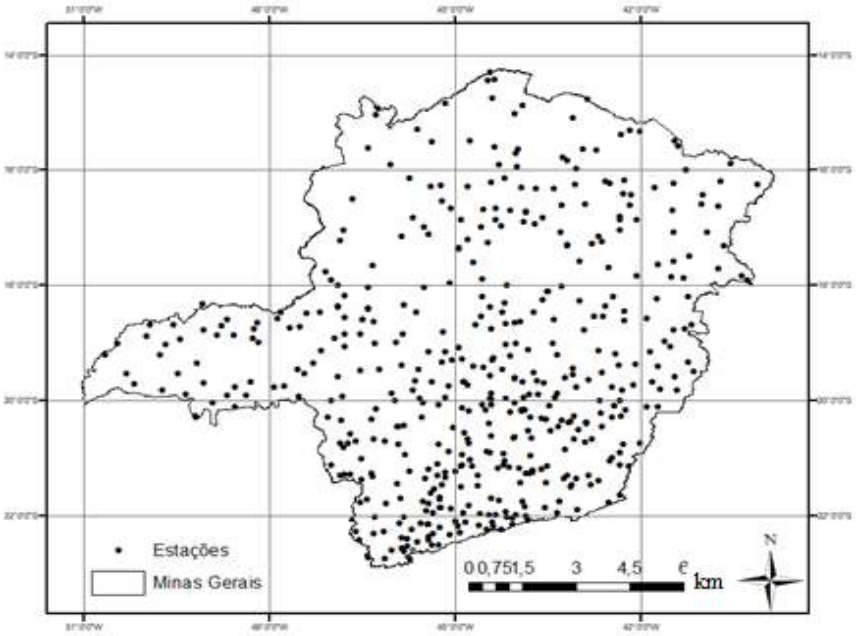
2. MATERIAL E MÉTODOS

O estado de Minas Gerais é o maior em extensão da região sudeste do Brasil - 586.520,732 km² (IBGE, 2019) e, como consequência, suas mesorregiões apresentam características topográficas e climáticas distintas. Segundo Mello e Viola (2013), os principais elementos da topografia mineira são a serra da Mantiqueira ao sul, a serra do Espinhaço do leste ao nordeste e a serra da Canastra no centro-oeste do estado.

Reboita *et al.* (2015) obtiveram a classificação climática de Köppen-Geiger para Minas Gerais e verificaram que a classe climática predominante é Aw (67%). Ao sul do estado, devido a regiões de altitude elevada, encontram-se os climas Cwa (21%), e, em menores áreas, o Cwb (11%). Ao norte, há predominância do clima Aw e uma pequena área com climas Bsh e Bwh e, no extremo oeste, encontra-se o clima Am. Estes resultados são coerentes com os obtidos por Sá Junior (2009), Machado (2014) e Martins *et al.* (2018).

Para a realização do estudo utilizaram-se dados de 494 estações pluviométricas (Figura 1) distribuídas por todo o estado, cujas séries históricas de precipitação máxima diária anual obtidas no banco de dados Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas (SNIRH, 2018). A seleção foi feita com base na escolha de séries históricas com longos períodos de observação (acima de 15 anos) e que estivem distribuídas ao longo de todo o estado.

Figura 1 - Estações pluviométricas utilizadas para o estudo em Minas Gerais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A primeira etapa para regionalização dos dados pluviométricos foi obter as regiões hidrologicamente homogêneas do Estado por meio da análise de agrupamentos k-médias utilizando o pacote "Stats" (R Core Team, 2018) na linguagem de programação R (R Core Team, 2007). Como o algoritmo necessita de um número inicial pré-definido de grupos foi feito a estimativa do número ideal de grupos para a série de dados estudada por meio do comando "fviz_nbclust ()" no R (R Core Team, 2007) que determina e visualiza o número de grupos usando método das somas de quadrados de cada grupo. Tendo sido definido o número ideal, o algoritmo a cada iteração atribui o grupo formado ao centro do grupo mais próximo de acordo com a medida de distância Euclidiana entre os dois e, em seguida, os centros do novo grupo são recalculados até a convergência do algoritmo pelo número inicial definido.

A saída da análise de agrupamentos geralmente não é o resultado final. Ajustes subjetivos são frequentemente necessários para que haja coerência física das regiões visando diminuir a heterogeneidade das mesmas (YIN, 2016). Ajustaram-se os grupos formados pelo algoritmo conforme recomendações de Hosking e Wallis (1997): mover um ou mais pontos de uma região para outra e subdividir ou combinar regiões para reclassificar os grupos.

Com o objetivo de verificar a homogeneidade das regiões obtidas realizou-se um teste de significância Scott-Knott no programa estatístico SISVAR, desenvolvido por Ferreira (1998). Uma vez verificada a significância das regiões hidrologicamente homogêneas, foram obtidos os valores do "Index-Flood", ou fator de adimensionalização, por meio da adaptação da metodologia usada por Davis, Naghettini e Pinto (2000). Para tal, foram inicialmente ajustados os parâmetros regionais das relações IDF pelos valores de chuvas desagregadas a partir da precipitação máxima diária anual (Equação 1):

$$i_{(t,\,TR)} = \frac{K\,TR^{a}}{(t+b)^{c}} \qquad (1)$$

Em que:

i - intensidade média máxima (mm h^{-1});

TR - período de retorno (5, 10, 25, 50 e 100 anos);

t - tempo de duração da chuva (5min ≤ t ≤ 1440min);

K, a, b e c - parâmetros de ajuste regionais.

Os parâmetros da Equação 1 foram ajustados pelo método de otimização da minimização da soma dos quadrados dos desvios (Equação 2) entre valores observados e os estimados pela distribuição Gumbel.

$$SSD = \sum(i_{obs}-i_{calc})^2 \quad (2)$$

Em que:

SSD - Soma dos quadrados dos desvios;

i_{obs} - intensidades de precipitação estimadas pela distribuição de Gumbel (mm h^{-1});

i_{calc} - intensidades de precipitação calculadas pela relação IDF (mm h^{-1}).

Com os parâmetros das relações IDF ($i_{(t, TR)}$) regionais ajustados e as intensidades de precipitação médias ($\bar{i}$) regionais, obtidas da desagregação da precipitação máxima diária anual, foi possível obter os quantis regionais ($\mu_{(t,TR)}$) pela Equação 3.

$$\mu_{(t,TR)} = {}^{i_{(t, TR)}}/_{\bar{i}} \quad (3)$$

O segundo ajuste necessário é feito por meio da obtenção da equação de variável dependente $\bar{i_d}$ descrita na Equação 4.

$$\bar{i_d} = A\, t^{-B}\, P^C \quad (4)$$

Em que:

$\bar{i_d}$ - intensidade de precipitação média máxima regional para o tempo de duração da chuva (mm h^{-1});

t - tempo de duração da chuva (5min ≤ t ≤ 1440min);

P - precipitação total anual média (mm);

A, B e C - parâmetros de ajuste do modelo regional.

Com o ajuste dos parâmetros das Equações 3 e 4 para cada região homogênea do estado, foi possível estimar a chuva intensa ($i_{(t,TR,j)}$) de duração t (min), no local j, associada ao período de retorno TR (anos) descrita pela Equação 5.

$$i_{(t,TR,j)} = \bar{i}_d \times \mu_{(t,TR)} \quad (5)$$

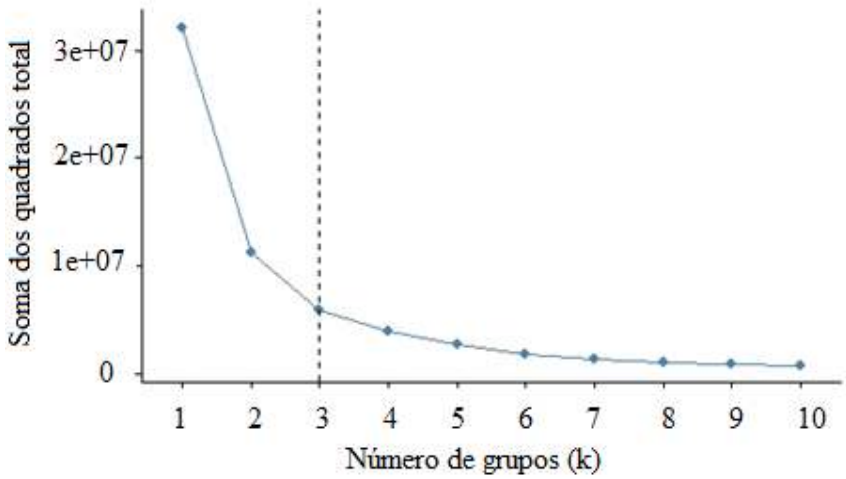
Em que:

$\mu_{(t, TR)}$ - quantil adimensional de frequência, de validade regional, associado a duração e ao período de retorno (Index-Flood).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de agrupamentos resultou em três grupos ideais (Figura 2). A definição é feita com base na redução significativa da soma dos quadrados total, significando que o aumento do número de grupos não melhorará a representação da homogeneidade.

Figura 2 - Gráfico da definição do número ideal de grupos para os dados de precipitação total anual em Minas Gerais, definido como três (3).

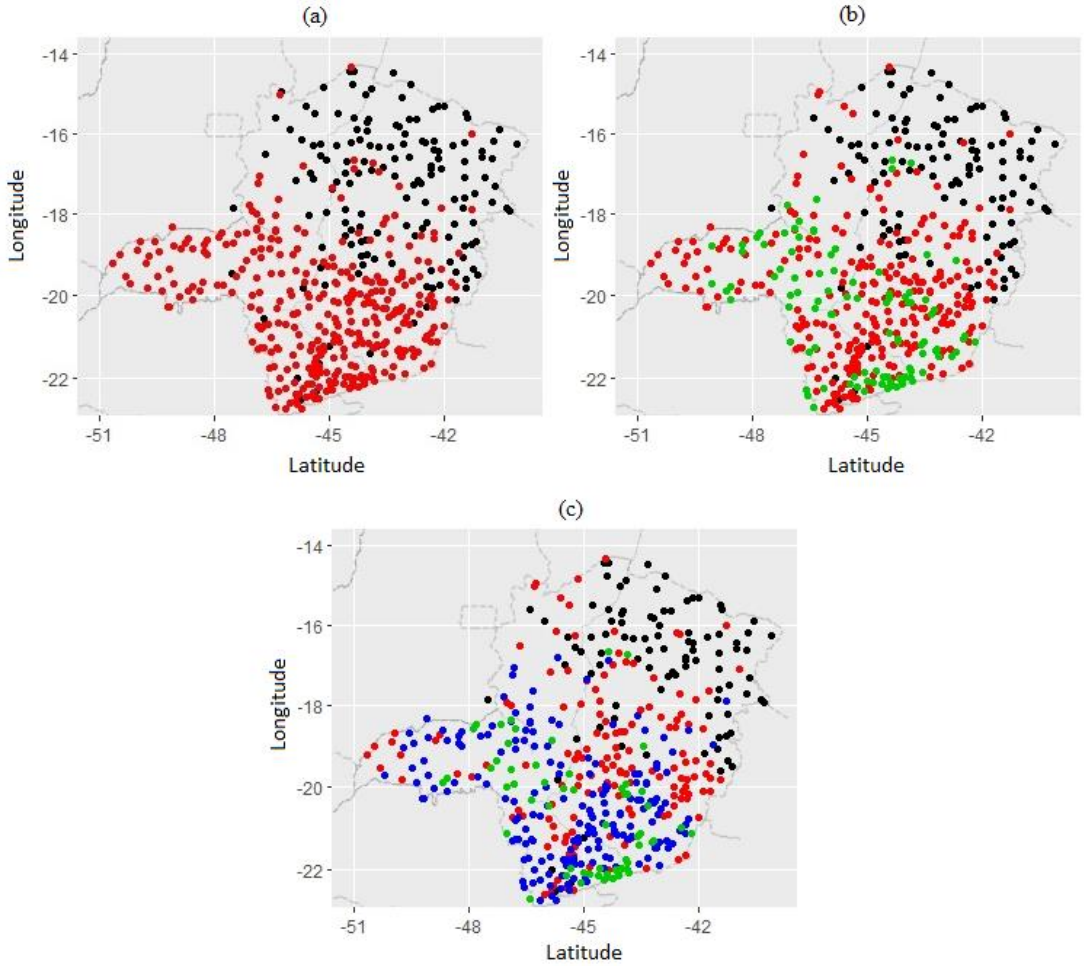


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Prosseguiu-se então para a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas pelo uso do pacote "Stats" (R Core Team, 2018), utilizando o algoritmo k-médias que resultou nos agrupamentos da Figura 3 contendo os mapas de Minas Gerais com dois (a), três (b) e quatro (c) grupos. Percebe-se que os grupos formados não são perfeitamente delineados, o que torna necessário a utilização dos ajustes subjetivos recomendados por Hosking e Wallis (1997).

Dantas e Pinto (2011) e Davis e Naghettini (2000) realizaram ajustes subjetivos para uma melhor delimitação das regiões homogêneas levando em consideração os dados ajustados previamente, as características de relevo, vegetação e processos formadores de precipitações, para o estado do Rio de Janeiro, bacia do rio São Francisco, respectivamente. Yin *et al.* (2016) em seu estudo para a China, também utilizaram o algoritmo k-médias e posteriormente realizaram ajustes subjetivos para obtenção das regiões melhor delimitadas.

Figura 3 – Mapas de regiões homogêneas de Minas Gerais com os agrupamentos gerados no R (R Core Team, 2018a) com dois (a), três (b) e quatro (c) grupos homogêneos.

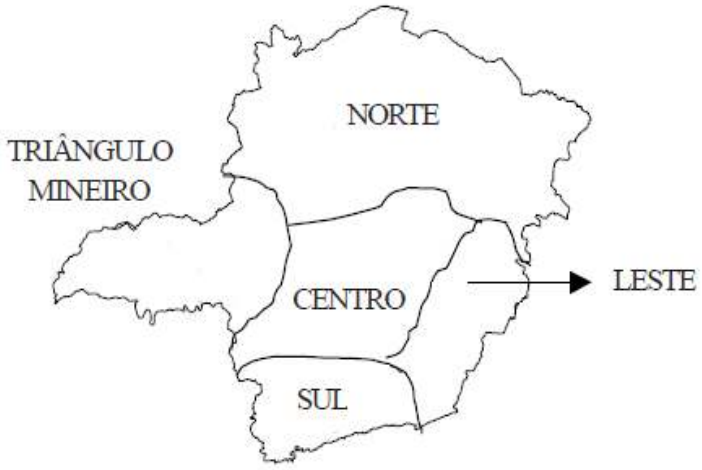


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para realizar os ajustes subjetivos alguns critérios foram levados em consideração. O primeiro deles foi a análise visual da permanência de agrupamento ocasionada na região Norte do estado que se manteve constante em (a), (b) e (c), como pode ser observado nos

pontos pretos da Figura 3, sendo definido o primeiro grupo homogêneo de três. No restante do Estado não houve uma tendência visual a ser considerada, portanto o critério utilizado foi baseado no estudo de Mello *et al.* (2003) que separou Minas Gerais em regiões conforme as diferenças climáticas observadas no estudo para a predição da chuva de projeto que estão apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Mapa de Minas Gerais e suas respectivas regiões.



Fonte: Adaptado de Mello *et al.* (2003).

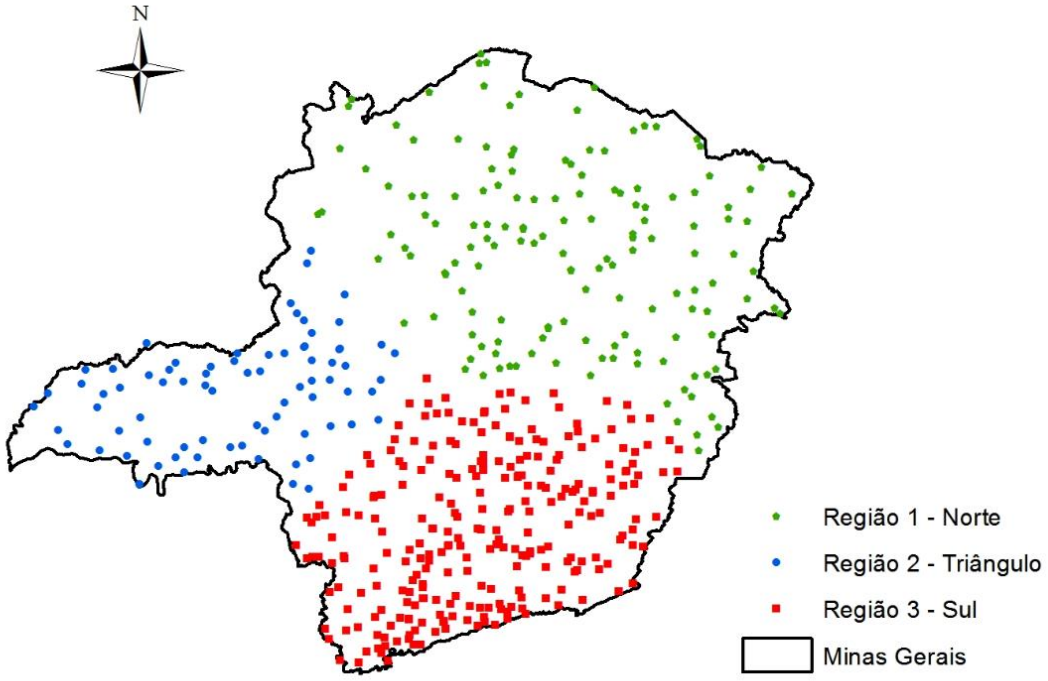
Por meio do mapa apresentado na Figura 4 foi feita a definição do segundo grupo homogêneo, o Triângulo Mineiro. O restante do estado foi considerado único e o último grupo homogêneo, já que o número ideal de grupos obtido foi três, como demonstrado na Figura 2. Formaram-se então, as seguintes regiões homogêneas:

1) Norte: pequena presença de grandes cadeias montanhosas, clima tendendo a semiárido com cobertura vegetal típica de cerrado e caatinga (MELLO *et al.*, 2003), classificação climática na sua totalidade como Aw e com pequenas áreas do tipo Am, Bsh e Bwh segundo Sá Junior (2009), Machado (2014), Reboita *et al.* (2015) e Martins *et al.* (2018) e precipitação total anual média de 989 mm;
2) Triângulo Mineiro: relevo típico de chapada, com altitude média de 752 m, variando de 428 m no município de Limeira do Oeste a 1120 na Serra do Salitre, com cobertura vegetal de cerrado (MELLO *et al.*, 2003, NOVAIS, 2011), classificação climática Aw e Cwa segundo Sá Junior (2009), Machado (2014),

Reboita *et al.* (2015) e Martins *et al.* (2018) e precipitação total anual média de 1386 mm;

3) Sul: relevo movimentado e presença de cadeias montanhosas com cobertura vegetal oscilando entre remanescentes de mata atlântica e o cerrado (MELLO *et al.*, 2003), classificação climática Cwa e Cwb segundo Reboita *et al.* (2015) e precipitação total anual média de 1394 mm.

Figura 5 - Mapa de Minas Gerais com as três regiões hidrologicamente homogêneas obtidas na análise de agrupamentos e análise subjetiva.



Fonte: Adaptado de Mello *et al.* (2003).

Os resultados da Tabela 1 são referentes ao teste de significância Scott-Knott no programa estatístico SISVAR. São apresentados os resultados do teste de significância que indicam alta significância entre as três regiões (a1, a2 e a3 para as regiões 1, 2 e 3 respectivamente) tornando as regiões hidrologicamente homogêneas.

Tabela 1 - Relatório fornecido pelo SISVAR para o teste de significância das regiões 1, 2 e 3.

Região	Resultado dos testes
1 - Norte	a1
2 - Triângulo Mineiro	a2
3 - Sul	a3

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Após os testes de heterogeneidade regional Dantas e Pinto (2011) constataram que a bacia do rio São Francisco compõe apenas uma única região homogênea, enquanto Davis e Naghettini (2000) dividiram o Rio de Janeiro em quatro regiões homogêneas assim como Yin *et al.* (2016) em seu estudo para a China. Os parâmetros das relações IDF regionais obtidos estão contidos nas equações das relações IDF na Tabela 2.

Tabela 2 - Relações IDF regionais com seus respectivos r^2 ($i = mmh^{-1}$; t = min, TR = anos).

Regiões Homogêneas	Relação IDF regional	r^2
1 - Norte	$i = \frac{575{,}5021\ TR^{0{,}3055}}{(t+7{,}6622)^{0{,}6514}}$	0,9947
2- Triângulo Mineiro	$i = \frac{617{,}6256\ TR^{0{,}3079}}{(t+7{,}6513)^{0{,}6511}}$	0,9946
3 - Sul	$i = \frac{285{,}2976\ TR^{0{,}3080}}{(t+1{,}9002)^{0{,}4724}}$	0,9199

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para avaliar se o ajuste encontrado para as intensidades de precipitação observadas e calculadas foi satisfatório, foram calculados os r^2 contidos na Tabela 2. Como pode ser observado, os valores de r^2 foram altos, próximos a 1, indicando o bom ajuste da equação regional.

Com as IDF regionais e as intensidades de precipitação médias regionais da desagregação foram obtidos os quantis regionais ($\mu_{(t,TR)}$) apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5 para as regiões Norte, Triângulo e Sul, respectivamente, com base na Equação 3.

Tabela 3 - Quantis regionais ($\mu_{(t,TR)}$) ou "Index-Flood" para diferentes tempos de retorno (TR) e duração (t) para região 1 (Norte).

TR (anos)	t (min)											
	1440	720	600	480	360	60	30	25	20	15	10	5
5	2,338	2,153	2,017	1,863	1,679	1,706	1,688	1,696	1,699	1,679	1,707	1,683
10	2,889	2,661	2,493	2,302	2,075	2,108	2,086	2,096	2,100	2,075	2,109	2,080
25	3,823	3,520	3,299	3,046	2,746	2,789	2,760	2,774	2,778	2,745	2,790	2,752
50	4,724	4,350	4,077	3,764	3,393	3,447	3,411	3,428	3,433	3,392	3,449	3,402
100	5,839	5,376	5,038	4,651	4,193	4,260	4,216	4,236	4,243	4,193	4,262	4,204

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Tabela 4 - Quantis regionais ($\mu_{(t,TR)}$) ou "Index-Flood" para diferentes tempos de retorno (TR) e duração (t) para região 2 (Triângulo Mineiro).

TR (anos)	t (min)											
	1440	720	600	480	360	60	30	25	20	15	10	5
5	2,342	2,156	2,020	1,865	1,681	1,707	1,689	1,698	1,700	1,680	1,708	1,685
10	2,899	2,669	2,501	2,309	2,081	2,113	2,091	2,101	2,104	2,080	2,114	2,085
25	3,844	3,539	3,316	3,061	2,760	2,802	2,773	2,786	2,790	2,758	2,803	2,765
50	4,758	4,380	4,105	3,790	3,416	3,469	3,433	3,449	3,454	3,414	3,470	3,423
100	5,890	5,422	5,081	4,691	4,229	4,294	4,249	4,270	4,276	4,226	4,296	4,237

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Tabela 5 - Quantis regionais ($\mu_{(t,TR)}$) ou "Index-Flood" par diferentes tempos de retorno (TR) e duração (t) para região 3 (Sul).

TR (anos)	t (min)											
	1440	720	600	480	360	60	30	25	20	15	10	5
5	4,176	3,406	3,093	2,748	2,360	1,833	1,694	1,682	1,665	1,634	1,666	1,712
10	5,170	4,217	3,829	3,403	2,922	2,269	2,097	2,082	2,062	2,022	2,063	2,119
25	6,856	5,592	5,078	4,512	3,874	3,009	2,781	2,760	2,734	2,682	2,735	2,810
50	8,487	6,923	6,286	5,586	4,796	3,726	3,443	3,417	3,385	3,320	3,386	3,479
100	10,507	8,570	7,782	6,915	5,938	4,612	4,262	4,231	4,190	4,110	4,192	4,307

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Ao avaliar as Tabelas 3, 4 e 5 é possível verificar que os valores dos Quantis regionais ($\mu_{(t,TR)}$) aumentam à medida que aumenta o tempo de retorno e o tempo de duração da chuva, o que também foi encontrado por Dantas e Pinto (2011) e Davis e Naghettini (2000). Para a região 1 os valores variaram de 1,68338 a 5,83867, para a região 2 de 1,68463 a 5,89027

e para a região 3 de 1,71170 a 10,50737. Este aumento está relacionado ao risco que uma chuva intensa pode oferecer à medida que sua duração aumenta.

A segunda etapa consistiu na obtenção das equações de intensidade de precipitação média máxima regional ($\overline{i_d}$) apresentadas na Tabela 6, e percebe-se pelos valores de r^2 que o ajuste para todas as equações foi satisfatório, visto que os valores ficaram próximos a 1.

Tabela 6 - Equação da intensidade de precipitação média máxima regional e seus respectivos r^2 ($\overline{i_d}$ = mm h^{-1}; t = min; P = mm).

Regiões homogêneas	Equação da intensidade de precipitação média máxima regional	r^2
1 - Norte	$\overline{i_d} = 64{,}2419\ t^{-0{,}4653}\ P^{0{,}1922}$	0,9686
2 - Triângulo Mineiro	$\overline{i_d} = 23{,}9628\ t^{-0{,}4653}\ P^{0{,}3296}$	0,9713
3 - Sul	$\overline{i_d} = 28{,}7623\ t^{-0{,}4653}\ P^{0{,}2995}$	0,9664

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Associando as equações da Tabela 6, os quantis regionais das tabelas 3, 4 e 5 e os valores de precipitação média anual local (P), é possível estimar a chuva intensa ($i_{(t,TR,j)}$) ou relação IDF local por meio da Equação 5, que poderá utilizada como chuva de projeto para dimensionamento de obras hidráulicas. As relações IDF regionais finais são:

1) Norte: $i_{(t,TR,j)} = \left(64{,}2419\ t^{-0{,}4653}\ P^{0{,}1922}\right)\mu_{(t,TR)}$;
2) Triângulo Mineiro: $i_{(t,TR,j)} = \left(23{,}9628\ t^{-0{,}4653}\ P^{0{,}3296}\right)\mu_{(t,TR)}$;
3) Sul: $i_{(t,TR,j)} = \left(28{,}7623\ t^{-0{,}4653}\ P^{0{,}2995}\right)\mu_{(t,TR)}$.

Verifica-se que as variações de A (23,9628 a 64,2419), B (0,4653) e C (0,1922 a 0,3296) encontram-se dentro das faixas encontrada por Davis e Naghettini (2000) em seu estudo para o Rio de Janeiro, no qual foi baseado este trabalho, sendo eles A: 16,204 a 85,264; B: 0,339 a 0,789 e C: 0,234 a 0,564. Esta regionalização permitirá um cálculo mais simplificado das chuvas

de projeto em Minas Gerais e contribuirá para otimização dos estudos hidrológicos necessários para os corretos dimensionamentos.

4. CONCLUSÕES

A regionalização do estado de Minas Gerais resultou em três regiões hidrologicamente homogêneas: Norte, Triângulo Mineiro e Sul, altamente significativas (a1, a2 e a3), o que indica que podem ser consideradas áreas com características distintas.

Os parâmetros ajustados para as relações IDF regionais e os valores de "Index-Flood" apresentaram bom ajuste dos dados, evidenciado pelos valores elevados de r^2 (superiores a 98%). Tal constatação permite inferir que as intensidades de precipitação média máxima regionais podem ser obtidas pelas relações geradas nesse trabalho, principalmente nas localidades com ausência de coleta de dados pluviométricos.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, A.; MAHESWARAN, R.; SEHGAL, V.; KHOSA, R.; SIVAKUMAR, B.; BERNHOFER, C. Hydrologic regionalization using wavelet-based multiscale entropy method. **Journal of Hydrology**, v.538, p.22-32, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.023.

BACK, A.J.; HENN, A.; OLIVEIRA, J.L.R. Heavy rainfall equations for Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.6, p.2127-2134, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600027.

BASU, B; SRINIVAS, V.V. Evaluation of the "Index-Flood" approach related regional frequency analysis procedures. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.21, n.1, p.1-12, 2016. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001264.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; VARGAS, M. M.; CORRÊA, L. de L.; CALDEIRA, T. L.; DURÃES, M. F.; AGUIAR, M. S. Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions. **Journal of Hydrology**, v.541, p.1406-1419, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.046.

CALEGARIO, A.T. **Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e comportamento das vazões mínima e média regionalizadas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/8210. Acesso em: 20 set. 2020.

DALRYMPLE, T. Flood frequency analysis. U.S. Geological Survey, paper 1543A, 1960. DOI: https://doi.org/10.3133/wsp1543A.

DANTAS, C.E.O.; PINTO, E.J.A. Análise de frequência regional das precipitações máximas diárias da bacia do rio São Francisco no Estado de Minas Gerais - Brasil. *In*: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011, Porto de Galinhas. **Anais** [...] Porto de Galinhas: Livro de Resumos, 2011. Disponível em: https://iwra.org/member/congress/resource/PAP00-5839.pdf. Acesso em 01 set. 2020.

DAVIS, E.G.; NAGHETTINI, M.C. **Estudo de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro**. 2. ed. Brasília: CPRM, 2000, 146p. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17229/12/rel_proj_rj_chuvas.pdf. Acesso em: 15 set. 2020.

FARSADNIA, F.; KAMROOD, M.R.; NIA, A.M.; MODARRES, R.; BRAY, M.T.; HAN, D.; SADATINEJAD, J. Identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps. **Journal of Hydrology**, v.509, p.387-397, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.050.

FERREIRA, D. F. **Sisvar-sistema de análise de variância para dados balanceados**. Lavras: UFLA, 1998.

FREITAS, J.C.; ANDRADE, A.R.S.; BRAGA, C.C.; GODOI NETO, A. H.; ALMEIDA, T.F. Análise de agrupamentos na identificação de regiões homogêneas de índices climáticos no Estado da Paraíba, PB - Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.4, 732-748, 2013. ISSN:1984-2295. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233065. Acesso em: 9 set. 2020.

GADO, T. A.; NGUYEN VAN-T. Regional estimation of floods for ungauged sites using partial duration series and scaling approach. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.21, n.12, p.1-12, 2016. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001439.

GHANMI, H.; BARGAOUI, Z.; MALLET, C. Estimation of intensity-duration-frequency relationships according to the property of scale invariance and regionalization analysis in a Mediterranean coastal area. **Journal of Hydrology**, v.541, p.38-49, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.002.

GOYAL, M. K.; GUPTA, V. Identification of homogeneous rainfall regimes in Northeast region of India using fuzzy cluster analysis. **Water Resources Management**, v.28, p.13, p.4491-4511, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s11269-014-0699-7.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis:** An approach based on L-moments. Cambridge: University Press, 1997, 224 p. Disponível em: https://aquaknow.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/regional_frequency_analysis._an_approach_based_on_l-moments.pdf . Acesso em: 06 ago. 2020.

IBGE. Minas Gerais - Panorama. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama. Acesso em: 10 jul. 2019.

MACHADO, L. A. Classificação climática para Minas Gerais por meio do método de agrupamento não hierárquico de K-means. **Cadernos do Leste**, v.14, n.14, p.45-63, 2014. DOI: https://doi.org/10.29327/249218.14.14-3.

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Le Cam, L.M.; Neyman. J. (org.) **Proceeding of fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability**. v.1. Berkeley: Unversity of California Press, 1967, p.281-297. Disponível em: https://projecteuclid.org/ebooks/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Some-methods-for-classification-and-analysis-of-multivariate-observations/chapter/Some-methods-for-classification-and-analysis-of-multivariate-observations/bsmsp/1200512992. Acesso em: 05 set. 2020.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. Porto Alegre: Artmed, 2008. 270p. ISBN 10-858260498X.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149–164, 2018. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, p.37-44, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100004.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. Modelos matemáticos para predição da chuva de projeto para regiões do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.7, n.1, p.121-128, 2003. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100020.

MIRANDA, A. C. R. **Regiões hidrologicamente homogêneas na Amazônia com base nas precipitações mensais**. 2016. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: https://locus.ufv.br//handle/123456789/8279. Acesso em: 13 jun. 2020.

MIRHOSSEINI, G.; SRIVASTAVA, P.; STEFANOVA, L. The impact of climate change on rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves in Alabama. **Regional Environmental Change**. v.13, p.25-33, 2013. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-012-0375-5.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/454. Acesso em: 19 set. 2020.

NOVAIS, G. T. **Caracterização climática da mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e do entorno da Serra da Canastra (MG)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16101/1/CaracterizacaoClimaticaMesorregiao.pdf. Acesso em: 12 ago. 2020.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia.** v.17, n.11, p.206-226, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493.

SÁ JÚNIOR, A. de. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade

Federal de Lavras, Lavras, 2009. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3076. Acesso em: 13 jul. 2020.

SINGH, S. K.; LO, E. Y. M.; XIAOSHENG, Q. Cluster analysis of monthly precipitation over the western maritime continent under climate change. **Climate**. v.5, n.84, p.1-20, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/cli5040084.

SNIRH. **Séries históricas de estações**. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. Acesso em: 1 jan. 2018.

STRNAD, F.; MORAVEC, V.; MARKONIS, Y.; MÁCA, P.; MASNER, J.; STOČES, M.; HANEL, M. An index-flood statistical model for hydrological drought assessment. **Water**, v.12, p.3-17, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/w12041213.

TEAM, R. C. **An introduction to R**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2007. Disponível em: http://www.math.chalmers.se/Stat/Grundutb/CTH/mve186/1415/R-Binder.pdf.: Acesso em: 8 set 2020.

TEAM, R. C. **The R Stats package**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/00Index.html. Acesso em: 13 jun 2020.

UPADHYAYA, S.; RAMSANKARAN, R. A. A. J. Multi-Index rain detection: a new approach for regional rain area detection from remotely sensed data. **Journal of Hydrometeorology**, v.15, p.2314-2330, 2014. DOI: https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0006.1.

YIN, Y.; CHEN, H.; XU, C-YU.; XU. W.; SUN, S. Spatio-temporal characteristics of the extreme precipitation by L-moment-based “Index-Flood” method in the Yangtze River Delta region, China. **Theoretical and Applied Climatology**, v.124, p.1005-1022, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s00704-015-1478-y.