Potencial uso das informações de chuvas obtidas por sensoriamento remoto na análise não paramétrica de eventos extremos na bacia do rio Madeira

Potential of rain information obtained by remote sensing in non-parametric analysis of extreme events in rio Madeira bacía

• **Data de entrada:**
29/08/2018

• **Data de aprovação:**
13/02/2020

Vinicius Alexandre Sikora de Souza^{1*} | Daniel Medeiros Moreira² | Otto Corrêa Rotunno Filho¹ | Anderson Paulo Rudke³ | Claudia Daza Andrade⁴ | Fabricio Polifke da Silva¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.050>

ORCID ID

Souza VAS <https://orcid.org/0000-0002-5902-6139>

Moreira DM <https://orcid.org/0000-0002-8915-094X>

Rotunno Filho OC <https://orcid.org/0000-0003-2763-4401>

Rudke AP <https://orcid.org/0000-0003-2970-5453>

Andrade CD <https://orcid.org/0000-0001-6074-152X>

Silva FP <https://orcid.org/0000-0001-7483-759X>

Resumo

O trabalho se propõe a avaliar o emprego de dados satelitais do tipo Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) para a geração de curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) na bacia do rio Madeira. Curvas IDF foram geradas simultaneamente para dados observados em 37 pluviômetros distribuídos na bacia e para os píxeis do CHIRPS que abrangem geograficamente essas estações observacionais *in situ*. Inicialmente, os dados foram analisados mediante o ajuste da distribuição de Gumbel para períodos de retorno que se estendem de 2 a 100 anos e duração da chuva de 5 minutos a 24 horas. Na validação das equações IDF, utilizou-se o coeficiente de determinação da regressão (r^2) e avaliaram-se os resíduos produzidos. Observa-se que as equações obtidas pelo estudo apresentam uma vasta aplicabilidade em obras de engenharia e, em especial, em atividades que requeiram suporte hidrológico devido à diversidade de durações e de tempos de recorrência utilizados. Além disso, a análise de erros e a estimativa dos coeficientes de determinação das funções IDF, que estiveram próximos de 0,70, ressaltam o uso das mesmas na representação dos eventos extremos. A comparação das bases de dados observacionais e de satélite permitiu estabelecer a confiabilidade do uso de dados do satélite CHIRPS na construção de relações IDF para situações em que não se dispõe de informações pluviométricas locais, embora as discrepâncias entre as bases tendam a aumentar e a ser diretamente proporcionais ao período de retorno.

Palavras-chave: Eventos extremos de chuva. Precipitação máxima. Curva IDF Sensoriamento remoto.

Abstract

The work proposes to evaluate the use of Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS)-type satellite data for the generation of intensity-duration-frequency curves (IDF) in the Madeira River basin. IDF curves were generated simultaneously for data observed in 37 pluviometers distributed in the basin and for the

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil.

² Serviço Geológico do Brasil - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil.

³ Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil.

⁴ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Seropédica - Rio de Janeiro - Brasil.

* **Autor correspondente:** vass1000@hotmail.com.

CHIRPS pixels that geographically cover these observational stations in situ. Initially, the data were analyzed by adjusting the Gumbel distribution for return periods ranging from 2 to 100 years and rain duration of 5 minutes to 24 hours. In the validation procedure of the IDF equations, the coefficient of determination of the regression (r^2) was used and the residues produced were evaluated. It is observed that the equations obtained by the study present a wide applicability in engineering works and, especially, in activities that require hydrological support, due to the diversity of durations and return periods used, in addition, the analysis of errors and the estimation of the coefficients of determination of the IDF functions, which were close to 0.70, highlight their use in the representation of extreme events. The comparison of the observational and satellite databases allowed to establish the reliability of the use of CHIRPS satellite data in the construction of IDF relations for situations where local rainfall information is not available, although the discrepancies between the bases tend to increase and be directly proportional to the return period.

Keywords: Extreme rainfall events. Maximum rainfall. IDF Curve. Remote Sensing.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento de eventos hidrológicos extremos é um requisito em projetos de drenagem, impermeabilização e outras obras de engenharia, tanto em áreas urbanas como rurais, uma vez que permite que o projetista estime os riscos associados com a execução da obra e possa optar pela melhor alternativa sob o ponto de vista da relação benefício-custo, fundamentando ainda a correspondente escolha em termos questões técnicas de desempenho e de segurança.

A chuva, dentre as forçantes hidrológicas, é notadamente a que mais interfere na vida humana, porquanto configura-se como a principal entrada de água em um sistema hídrico continental, apresentando distribuição espaço-temporal relacionada com a produção da vazão e da evaporação, permitindo efetuar o balanço hídrico e estimar os níveis de água e os correspondentes escoamentos superficial e subterrâneo, bem como a variação do armazenamento de água do solo e estado de umidade na zona não saturada do solo. Em virtude de sua larga influência na construção da civilização humana e na ocupação e desenvolvimento de uma certa região, a chuva pode ser considerada a principal forma de suprimento hídrico para as atividades humanas de

ordem social, contemplando aspectos políticos, econômicos e culturais.

O conhecimento da variabilidade espaço-temporal das chuvas pode fornecer aspectos importantes, principalmente relacionados a sua previsão, destacando-se, por exemplo, a determinação de sua intensidade máxima, de sua duração e do seu tempo de recorrência, ou seja, da frequência com que, em média, o referido evento chuvoso possa vir novamente a ocorrer.

Uma forma amplamente aceita na comunidade hidrológica para a caracterização das chuvas extremas em uma determinada localidade é a utilização de curvas de intensidade-duração-frequência (IDF). Essas relações consistem em modelos matemáticos semiempíricos que fornecem a previsão da intensidade precipitada por meio da definição da duração da chuva e sua correspondente distribuição temporal. Destaca-se que a inferência da pluviosidade extrema é possível na medida em que se ajustem distribuições probabilísticas, propiciando que sejam modeladas estatisticamente.

No território nacional, com exceção das localidades com grau de desenvolvimento mais significativo, via de regra há diversas regiões que ca-

recem da disponibilidade de tais modelos, como é o caso, por exemplo, da região da Amazônia Ocidental, a qual é praticamente desprovida de informações de dados pluviométricos que permitam caracterizar e quantificar chuvas intensas. Assim, induz-se, quando possível, o uso de postos meteorológicos próximos ou de características climatológicas similares às da localidade na qual o projeto de obras hidráulicas está sendo concebido para ser realizado.

Tal procedimento, entretanto, pode levar a estimativas pouco confiáveis, devido a essa prática apresentar o risco de a obra ser subestimada, acarretando problemas, principalmente, de ordem social, assim como ser superestimada, inflando os custos e onerando em demasia a sua implantação.

Estimativas de chuva intensas a partir de sensores espaciais apresentam uma oportunidade para complementar a rede observacional existente e permitir o desenvolvimento de aplicações que impliquem incorporação do fenômeno pluviométrico em tempo real. No entanto, os benefícios dessas estimativas só podem ser utilizados se as estimativas forem devidamente validadas, e a precisão, descrita.

Alguns estudos já foram executados na região proposta para estudo de caso, investigando a macroecologia da região amazônica por meio de dados oriundos de sensoriamento remoto (ARAGÃO et al., 2008; SAATCHI et al., 2008; MALHADO et al., 2012; ZHONG et al., 2012)

Por outro lado, não houve estudos que aferissem a acurácia da base de dados do CHIRPS em gerar curvas IDF para a região. Assim, o presente estudo visa suprir essa lacuna do conhecimento prospectando a comparação entre curvas IDF geradas com séries históricas do CHIRPS e curvas modeladas com dados de pluviômetros para a parte brasileira da bacia do rio Madeira, que representa um dos principais afluentes do rio Amazonas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia do rio Madeira apresenta limites transfronteiriços internacionais, estendendo-se por Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%), perfazendo área total de drenagem de 1.324.727 km². Representa, assim, a maior sub-bacia amazônica (22%), com localização no sudoeste da bacia amazônica, mais precisamente na margem direita do rio Amazonas. Na porção brasileira da bacia do rio Madeira (Fig. 1), área que é objeto deste estudo, compreende os estados de Rondônia, Amazonas, Mato Grosso (porção noroeste) e Acre (pequena faixa a sudeste do estado), com área aproximada de 607.033 km².

De acordo com a classificação de Köppen, o clima na bacia apresenta três (3) zonas Af, tropical úmido a superúmido, Am, tropical chuvoso, com chuvas do tipo monção, com uma estação seca de pequena duração, e Aw, tropical quente com estação seca de inverno (PEEL et al., 2007).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Madeira

2.2 Aquisição dos dados

As informações de precipitação de estações pluviométricas utilizadas foram obtidas em volumes acumulados diários, medidos entre 7h-7h, disponibilizadas pela Agência Nacional das Águas em parceria com o Serviço Geológico do Brasil, na forma de séries históricas no sistema de informações hidrológicas HidroWeb (ANA, 2018).

Para a bacia em análise, esse órgão mantém, em seus registros, dados para 613 estações pluviométricas na área de estudo. Contudo, em uma triagem preliminar, realizada para atender às recomendações de Cetesb (1979), quanto às análises de extremos, verificou-se que apenas 37 destas (Fig. 2) estavam contidas no intervalo de tempo (2000 a 2015) com mais estações sem fa-

lhas no período mínimo de 10 anos para os meses chuvosos (outubro a março).

Já os dados de precipitação, provindos de sensoriamento remoto, foram obtidos do produto CHIRPS, de resolução de 0,05°, disponibilizado pelo Climate Hazards Group (CHG, <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>). Esses foram validados para uso na região amazônica pelo trabalho de Correa et al. (2017). Tal conjunto de dados abrange uma cobertura espacial quase global, latitudes entre 50°S e 50°N em formato de acumulado diário e por um período superior a 30 anos (iniciando em 1981), com resolução espacial variando de 0,25 a 0,05°.

O CHIRPS utiliza informações do Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis version 7 (TMPA 3B42 v7) para calibrar

estimativas de precipitação obtidas por uma técnica denominada Cold Cloud Duration (CCD), combinada aos dados de superfície, na escala diária (DINKU, 2018). Além disso, o CHIRPS incorpora em sua formulação uma abordagem inteligente de interpolação de dados com informações de estações pluviométricas *in situ* para criar séries temporais. Dessa forma, para gerar dados diários de precipitação, os arquivos de chuva acumulada a cada cinco dias (pêntadas) e mensais são primeiramente criados. Os dados de monitoramento em solo que são combinados com grades do Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) no formato mensal e pentadal são adquiridos por meio de dados diários da Global Telecommunication System (GTS), dados diários e mensais da Global Historical Climate Network (GHCN) e dados mensais da Global Summary of the Day (GSOD) e da Southern African Science Service Centre for Climate Change and Adaptive Land Management (SASSCAL). Outras observações também são fornecidas por agências meteorológicas nacionais – o Brasil é um dos países que mais disponibilizam dados. Por fim, CCD diários são utilizados para identificar dias não precipitantes. Assim, os valores diários de CCD são traduzidos para precipitação usando as estimativas de regressão e a precipitação total de cada pêntada é alocada proporcionalmente entre os dias com precipitação.

Para ambas as séries de dados, utilizou-se, como critério na identificação de um evento extremo de chuva, o valor máximo diário registrado no decorrer de um ano, como proposto pela metodologia das curvas de intensidade-duração e frequência (IDF) (CARDOSO et al., 1998; OLIVEIRA et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2011). No caso, então, foi discriminado um evento para cada ano.

2.3 Geração das Equações IDF

Utilizou-se a distribuição de Gumbel para modelar e determinar os tempos de retorno (Tr) dos

eventos das séries históricas de extremos para as bases de dados do CHIRPS e dos pluviômetros, visto que tal distribuição estatística é a que melhor se ajusta à região estudada (SOUZA et al., 2017).

A variável reduzida de Gumbel (y), conforme Eq. 1, como preconizado por Gumbel (2004), pode ser expressa por

$$y = \frac{s_y}{s_x} \left[x_i - \left(x_m - s_x \frac{y_m}{s_y} \right) \right] \quad (1)$$

onde: s_x – desvio-padrão da série; x_i – valor de um elemento da amostra; x_m – média da amostra da série anual finita de n valores; s_y – desvio-padrão, valor tabelado; e y_m – média da variável reduzida (y), tabelada em função do número de dados da amostra.

O período de retorno (Tr) é definido como o intervalo, em anos, que um valor qualquer de chuva é igualado ou superado, em média, uma (1) vez no referido período. É estimado pela Eq. 2, sendo expresso como função da base dos logaritmos neperianos (e).

$$Tr = \frac{1}{1 - e^{-e^{-y}}} \quad (2)$$

Após a obtenção das curvas de Tr , ajustou-se uma reta de regressão estatística que compreendeu a amplitude dos dados analisados com coeficiente de ajuste (r^2) variando de 89% a aproximadamente 100%, como se observa na Tabela 1. Assim, aplicando esse ajuste, foi possível estimar as precipitações máximas com duração de “um dia” (1 dia) para diversos períodos de retorno, podendo até mesmo extrapolar informações para períodos de retorno maiores do que os contidos no intervalo de dados.

Tabela 1 - Coeficientes de ajuste das equações estimadas para os dados das estações analisadas.

Código	r ²		Código	r ²	
	Estação	CHIRPS		Estação	CHIRPS
359001	0,93	0,98	966001	0,90	0,93
459000	0,97	0,98	1058004	0,96	0,99
459001	0,98	0,96	1059000	0,99	0,97
560002	0,92	0,97	1061002	0,93	0,97
658000	0,87	0,99	1061003	0,97	0,97
660000	0,96	0,97	1062002	0,99	0,98
661001	0,96	0,95	1062003	0,99	0,89
662001	0,98	0,98	1062004	0,93	0,96
759000	0,98	0,97	1063000	0,99	0,97
760001	0,95	0,95	1063001	0,99	0,94
762002	0,97	0,93	1160000	0,98	0,98
762003	0,94	0,95	1160002	0,99	0,98
763001	0,87	0,98	1161000	0,99	0,94
862000	0,96	0,94	1161001	0,98	0,98
961003	0,99	0,95	1161002	0,99	0,98
962000	0,99	0,98	1161003	0,99	0,93
963001	0,98	0,94	1262000	1,00	0,97
963004	0,99	0,94	1262001	0,98	0,97

Depois de obtidas as alturas das chuvas para os períodos de 2 a 100 anos, estimaram-se as prováveis intensidades máximas médias para todas as durações de chuva de 5 minutos a 24 horas por meio da desagregação de chuva diária. Para tal procedimento, foram utilizados os quocientes das relações médias no ní-

vel nacional (Tabela 2) explicitados em Cetesb (1979). Cabe destacar que tais quocientes foram empregados em vários estudos, como os de Garcia et al. (2011), Silva et al. (2012), Souza et al. (2012), Aragão et al. (2013), Lorenzoni et al. (2013), Campos et al. (2014), Teodoro et al. (2014) e Campos et al. (2015).

Tabela 2 - Quocientes no nível nacional das relações entre durações.

Relação	Quociente	Relação	Quociente
5min/30min	0,34	1h/24h	0,42
10min/30min	0,54	6h/24h	0,72
15min/30min	0,70	8h/24h	0,78
20min/30min	0,81	10h/24h	0,82
25min/30min	0,91	12/24h	0,85
30min/1h	0,74	24h/1dia	1,14

Cabe ressaltar que os dados do CHIRPS não foram considerados chuvas de “um dia”, mas sim de 24h, a fim de corrigir a defasagem de tempo, porque as medições dos dados em estações pluviométricas foram realizadas às 7h da manhã, e não às 0h.

Ao se obter as informações de alturas máximas para os períodos e durações pretendidos, ge-

rou-se a equação IDF para cada estação pluviométrica e para cada pixel da base CHIRPS, que foram analisados por meio do estabelecimento das constantes – K, a, b e c – pelo método dos mínimos quadrados. Para a equação IDF geral (Eq. 3), que, segundo Villela e Mattos (1975), é o modelo matemático mais utilizado para expressar a relação IDF da precipitação, empregou-se o código computacional LAB Fit® (SILVA et al.,

2004), apontado por seus criadores como uma ferramenta eficaz no ajuste de curvas.

$$i_m = \frac{K \cdot Tr^a}{(t + b)^c} \quad (3)$$

onde: i_m – intensidade máxima média de precipitação, em mm/h; t – duração (minuto); e Tr – período de retorno (ano).

Na verificação da eficiência das equações IDF confeccionadas, utilizou-se o coeficiente de determinação da regressão estatística (r^2) (Eq. 4) e a verificação dos resíduos produzidos pelas diferenças na magnitude entre os dados pluviométricos extremos desagregados e modelados pela distribuição Gumbel (x_M) e os dados estimados pelas equações IDF confeccionadas neste estudo (x_E). Realizaram-se as seguintes análises: erro padrão médio (EPM) (Eq. 5); erro normalizado médio (ENM) (Eq. 6); e erro multiplicativo médio (EMM) (Eq. 7).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_M - \bar{x}_M)(x_E - \bar{x}_E)}{n - 1} \right)^2 \quad (4)$$

$$EPM = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \frac{(x_E - x_M)_i^2}{N} \right]} \quad (5)$$

$$ENM = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_E - x_M}{x_M} \right)_i \quad (6)$$

$$EMM = e^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n |\ln(x_E/x_M)_i|}{n} \right]} \quad (7)$$

onde: $\bar{x}_E$ – média do evento estimado; $\bar{x}_M$ – média dos eventos medidos; x_E – valor estimado; x_M – valor medido; e n – número total das estações de validação.

2.4 Comparação das Curvas IDF

Para avaliar a estimativa da precipitação gerada pelo CHIRPS durante os eventos extremos selecionados, utilizou-se a metodologia de comparação das curvas de intensidade-duração e frequência (IDF) para analisar a chuva estimada em relação à chuva coletada pelos pluviômetros localizados na região de estudo. Foram comparados os dados de chuva estimados pelo CHIRPS para os píxeis localizados no mesmo ponto das estações pluviométricas por meio da estimativa de EPM, ENM e dos resíduos estratificados por período de retorno.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As constantes da forma geral da equação IDF para os pluviômetros e píxeis do CHIRPS apresentadas na Tabela 3 e na Tabela 4 foram calibradas por este estudo utilizando a intensidade das precipitações máximas com durações de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 480, 600, 720 e 1.440 minutos, com períodos de retorno do fenômeno de 2, 5, 10, 20 e 100 anos. Logo, a equação obtida apresenta uma grande faixa de aplicação, devido à amplitude dos intervalos, permitindo que essa estimativa possa vir a ser utilizada no projeto de distintas obras hidráulicas.

Tabela 3 - Equações IDF dos pluviômetros e análises de eficiência.

Código	Parâmetros				EPM (mm)	ENM (%)	EMM	r ²
	K	a	b	c				
359001	636,669	0,299	13,868	0,714	24,135	32,937	1,092	0,711
459000	640,341	0,311	13,868	0,714	25,768	34,337	1,099	0,710
459001	688,387	0,298	13,868	0,714	26,312	33,842	1,093	0,708
560002	429,672	0,305	13,868	0,714	15,942	30,553	1,095	0,732
658000	808,308	0,166	13,868	0,714	18,122	28,786	1,063	0,710
660000	849,183	0,119	13,868	0,714	16,015	28,644	1,062	0,716
661001	436,057	0,348	13,868	0,714	20,107	36,105	1,126	0,725
662001	581,841	0,324	13,868	0,714	24,648	34,870	1,107	0,714
759000	785,864	0,248	13,868	0,714	24,328	31,450	1,076	0,703
760001	852,080	0,272	13,868	0,714	29,457	34,198	1,084	0,699
762002	861,038	0,330	13,868	0,714	38,914	41,979	1,118	0,699
762003	772,471	0,286	13,868	0,714	28,232	34,150	1,089	0,703
763001	270,115	0,063	13,868	0,714	3,123	38,355	1,143	0,758
862000	705,517	0,274	13,868	0,714	24,089	31,949	1,082	0,708
961003	859,828	0,305	13,868	0,714	34,658	38,015	1,101	0,699
962000	699,491	0,309	13,868	0,714	28,091	35,186	1,099	0,707
963001	726,076	0,306	13,868	0,714	28,881	35,365	1,098	0,705
963004	859,350	0,318	13,868	0,714	36,788	39,912	1,109	0,699
966001	607,684	0,290	13,868	0,714	21,995	31,694	1,088	0,714
1058004	718,030	0,286	13,868	0,714	26,060	33,206	1,088	0,706
1059000	901,304	0,294	13,868	0,714	34,679	37,466	1,095	0,697
1061002	713,582	0,236	13,868	0,714	20,662	29,847	1,072	0,710
1061003	798,941	0,312	13,868	0,714	33,050	37,687	1,103	0,701
1062002	796,350	0,324	13,868	0,714	34,780	39,406	1,111	0,702
1062003	589,447	0,312	13,868	0,714	23,677	33,588	1,099	0,714
1062004	712,058	0,237	13,868	0,714	20,723	29,886	1,072	0,710
1063000	802,926	0,316	13,868	0,714	33,848	38,340	1,106	0,701
1063001	848,730	0,335	13,868	0,714	39,170	42,604	1,122	0,700
1160000	750,796	0,300	13,868	0,714	29,201	35,204	1,095	0,704
1160002	665,543	0,315	13,868	0,714	27,459	35,367	1,102	0,708
1161000	834,457	0,313	13,868	0,714	34,696	38,488	1,104	0,700
1161001	730,861	0,313	13,868	0,714	30,165	36,438	1,103	0,705
1161002	784,068	0,322	13,868	0,714	33,884	38,812	1,110	0,702
1161003	655,380	0,301	13,868	0,714	25,188	33,485	1,094	0,710
1262000	799,549	0,309	13,868	0,714	32,570	37,246	1,101	0,701
1262001	827,482	0,321	13,868	0,714	24,849	56,895	1,267	0,705
1359001	700,000	0,304	13,868	0,714	22,733	42,111	1,163	0,709

Tabela 4 - Equações IDF dos píxeis do CHIRPS e análises de eficiência.

Código – Pixel	Parâmetros				EPM (mm)	ENM (%)	EMM	r ²
	K	a	b	c				
359001	649.057	0.315	13.868	0.714	26.638	34.972	1.102	0.710
459000	577.221	0.310	13.868	0.714	22.886	33.129	1.098	0.715
459001	712.492	0.312	13.868	0.714	29.090	35.831	1.101	0.706
560002	676.960	0.325	13.868	0.714	29.238	36.900	1.109	0.708
658000	618.165	0.317	13.868	0.714	25.544	34.698	1.103	0.712
660000	781.703	0.333	13.868	0.714	35.531	40.619	1.118	0.702
661001	697.287	0.316	13.868	0.714	28.951	36.049	1.103	0.707
662001	731.669	0.315	13.868	0.714	30.478	36.718	1.104	0.705
759000	678.632	0.315	13.868	0.714	28.031	35.605	1.103	0.708
760001	625.886	0.296	13.868	0.714	23.406	32.522	1.091	0.712
762002	643.798	0.287	13.868	0.714	23.156	32.031	1.087	0.711
762003	649.582	0.309	13.868	0.714	25.982	34.323	1.098	0.710
763001	742.403	0.321	13.868	0.714	31.817	37.779	1.108	0.704
862000	676.960	0.325	13.868	0.714	29.238	36.900	1.109	0.708
961003	681.507	0.320	13.868	0.714	28.794	36.299	1.106	0.707
962000	838.294	0.327	13.868	0.714	37.260	40.865	1.115	0.700
963001	597.222	0.305	13.868	0.714	23.133	32.870	1.095	0.714
963004	606.895	0.294	13.868	0.714	22.341	31.985	1.089	0.714
966001	657.276	0.270	13.868	0.714	21.810	30.916	1.080	0.711
1058004	759.784	0.318	13.868	0.714	32.200	37.733	1.107	0.703
1059000	589.716	0.315	13.868	0.714	23.947	33.855	1.101	0.714
1061002	582.887	0.309	13.868	0.714	22.970	33.063	1.097	0.715
1061003	629.529	0.318	13.868	0.714	26.201	35.058	1.104	0.711
1062002	747.304	0.319	13.868	0.714	31.669	37.509	1.106	0.704
1062003	827.249	0.241	13.868	0.714	24.967	31.597	1.074	0.701
1062004	575.312	0.320	13.868	0.714	23.904	34.252	1.104	0.715
1063000	726.358	0.317	13.868	0.714	30.432	36.799	1.105	0.705
1063001	677.198	0.265	13.868	0.714	22.068	30.881	1.079	0.710
1160000	861.613	0.321	13.868	0.714	37.361	40.408	1.111	0.699
1160002	656.419	0.322	13.868	0.714	27.983	36.161	1.107	0.709
1161000	580.230	0.288	13.868	0.714	20.648	31.095	1.086	0.717
1161001	732.511	0.328	13.868	0.714	32.415	38.685	1.113	0.704
1161002	934.637	0.335	13.868	0.714	43.421	44.731	1.124	0.697
1161003	740.297	0.222	13.868	0.714	20.284	29.574	1.069	0.709
1262000	763.751	0.319	13.868	0.714	32.479	37.911	1.107	0.703
1262001	759.270	0.312	13.868	0.714	31.168	36.767	1.102	0.703
1359001	714.660	0.323	13.868	0.714	30.827	37.501	1.109	0.705

Em termos gerais, é possível notar que as equações propostas para ambas as fontes de dados apresentam o comportamento típico para as curvas IDF, ou seja, a intensidade é indiretamente proporcional à duração, visto que as constantes a e c apresentaram magnitudes positivas. Assim, quanto menor for a duração da precipitação, maior é a intensidade média. Esse fato também indica que, no campo probabilístico, há uma menor chance de ocorrer chuvas com grandes magnitudes.

Verificou-se uma relação diretamente proporcional entre a intensidade e o período de retorno, evidenciando a diferença no uso do T_r para o dimensionamento de obras hidráulicas, visto que altos períodos de retorno indicam uma elevada intensidade da precipitação. Dessa forma, a concepção de projetos hidráulicos mais complexos necessita da previsão de grandezas hidrológicas de grande magnitude com um intervalo temporal de recorrência grande para que sejam estimadas máximas vazões ou precipitações que podem vir a ocorrer em certa localidade. Nesse contexto, o custo de tal projeto encontra-se intimamente ligado ao período de retorno de ocorrência do fenômeno (BEIJO et al., 2005).

Ao analisar os coeficientes regionais obtidos para as equações IDF, constata-se que as constantes “ b ” e “ c ” de cada localidade são iguais numericamente. Essa igualdade numérica possivelmente está associada a dois fatos: o primeiro seria o algoritmo de busca que atingiu uma certa limitação na parte do denominador da equação onde os tempos de duração utilizados são idênticos em todas as funções; e o segundo deve-se ao método de desagregação utilizado na transformação de chuvas diárias para eventos pluviométricos com durações menores, o qual emprega quocientes de desagregação idênticos para todas as séries históricas.

Outras pesquisas também descrevem coeficientes regionais iguais, como o estudo de Oliveira et al. (2000). Esses autores notaram fato semelhante

aos descritos anteriormente, sendo que, em seus estudos, foi utilizada uma metodologia semelhante à exposta neste trabalho na estimativa de equações de chuvas intensas para alguns locais no estado de Goiás.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas também as análises dos resíduos gerados por cada equação IDF ao estimar os dados medidos e modelados pela distribuição de Gumbel, os quais foram utilizados no processo de confecção desse modelo matemático de chuvas extremas. Salienta-se que as flutuações dos resultados das equações não apresentam uma magnitude significativa quando comparadas aos dados utilizados em sua estimação, pois a taxa do erro padrão médio (EPM) oscilou entre 3,12 a 43,12, concordando com os valores obtidos para o erro normalizado médio (ENM), que se encontram na faixa de 28 a 56%.

Os valores positivos encontrados nos ENM revelam que as equações propostas por este estudo tendem a superestimar os dados medidos. Ressalta-se que o trabalho de Oliveira et al. (2000) evidenciou erros normalizados médios de aproximadamente 20% em relação às equações IDF de algumas localidades de Goiás elaboradas em seu estudo.

Enfatiza-se, ainda, que o índice do erro multiplicativo médio (EMM) que, segundo Moog e Jirka (1998), é muito sensível a pequenas variações, assumiu valores que estiveram próximos a 1, o que mostra a inexistência de diferenças expressivas nos resultados fornecidos pelos modelos matemáticos quando comparados aos dados medidos.

Vale salientar que as equações propostas pelo presente trabalho apresentaram um coeficiente de regressão variando aproximadamente de 0,70 a 0,75, indicando, assim, que acima de 70 % das variações dos dados da intensidade são explicados pelas variações da duração e do período de retorno.

No que concerne a comparação da modelagem de eventos extremos pelas duas fontes de dados

por meio da estimação dos erros padrões médios e erros percentuais (Fig. 2), pode-se afirmar que não existe um padrão geográfico quanto à incidência maior ou menor desses erros, visto que

pontos próximos de amostragem exibiram diferentes valores de erros. Adicionalmente, não foram verificados padrões desses erros ao longo da latitude e da longitude.

Figura 2 - Análise dos erros EPM e ENM para a modelagem de eventos extremos de chuva obtidos a partir do contraste entre dados de pluviômetros e dados CHIRPS

A magnitude dos erros normais médios variou de -60 a 260%. Assim, evidencia-se uma tendência, na maioria dos casos, de superestimação dos dados do CHIRPS quanto à comparação dos dados de pluviômetros. Todavia, os erros padrões médios não ultrapassaram 70 mm, estando a maioria dos pontos comparados abaixo de 30 mm, o que denota que, embora haja alguns dados mais discrepantes, as correspondentes magnitudes são relativamente baixas, expressando, em linhas gerais, que a modelagem desses fenômenos por dados oriundos do CHIRPS pode fornecer uma estimativa próxima àquela dos dados de pluviômetros. Assim, em localidades em que não se encontram informações de estações de

medições de pluviômetros, a utilização de séries históricas da missão CHIRPS pode se apresentar como uma solução viável e bastante oportuna.

Como observação final, analisando-se os resíduos mediante a segmentação por tempo de retorno (TR) (Fig. 3), ilustra-se a tendência do aumento nas diferenças entre as duas fontes de dados ao se aumentar o tempo de retorno. Assim, existe uma relação diretamente proporcional entre os erros na estimativa da chuva e sua probabilidade de ocorrência. Tal fato deve ser levado em consideração ao utilizar o CHIRPS como fonte de informação em obras hidráulicas que exijam projeções de eventos pluviométricos extremos com maiores tempos de ocorrência.

Figura 3 - Resíduos obtidos pela comparação entre as modelagens de eventos extremos por meio de pluviômetros e por meio do produto CHIRPS

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho estabeleceu como objetivo construir equações de chuvas intensas que poderão ser utilizadas como subsídio no dimensionamento de obras hidráulicas e em estudos hidrológicos, adotando-se a bacia do rio Madeira como área de estudo.

O estudo realizado confirma que as equações propostas para estimar a intensidade das precipitações máximas, tanto pelos pluviômetros como para o CHIRPS, são de grande aplicabilidade para as regiões da bacia do rio Madeira, apresentando alto grau de correlação com as variáveis relacionadas, duração e o período de retorno

do fenômeno. Essa constatação foi realizada a partir de análises estatísticas e de comparações com dados da literatura, sendo possível verificar também o alto grau de confiabilidade das curvas IDF, visto que os valores do coeficiente de determinação estiveram em torno de 0,70 e os erros analisados não foram tão elevados.

Constatou-se que a fonte de dados do CHIRPS é uma importante base para estimativas de eventos extremos em obras de micro e macro-drenagem em localidades desprovidas de pluviômetros, pois, comparadas a pluviômetros, a dispersão dos erros não é de grande magnitude em períodos de recorrência abaixo de 50 anos; contudo, as discrepâncias entre as bases de dados tendem a ser diretamente proporcionais ao período de retorno.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a instalação de estações pluviométricas com registros temporais com detalhamento maior do que a escala diária. A proposição seria de confrontar os resultados obtidos com aqueles que seriam obtidos em uma escala temporal mais refinada, visto que os dados de precipitações adquiridos em escalas menores do que o dia foram obtidos de forma sintética, podendo, naturalmente, não corresponder fielmente às características temporais da precipitação na região em estudo nessas escalas de tempo inferiores ao dia.

5 AGRADECIMENTOS

Inicialmente, os autores agradecem a bolsa de estudos concedida ao primeiro autor fornecida pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Agradecimentos são estendidos à FAPERJ, por meio dos projetos FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) – E-26/010.002980/2014, FAPERJ no. E_12/2015 e FAPERJ no. E_22/2016, bem como ao suporte oferecido pelo CNPq por meio do projeto Edital no.

12/2016 – Processo 306944/2016-2 e projetos Edital Universal no. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 e no. 28/2018 – Processo 435714/2018-0 bem como pelo apoio da CAPES – Código de Financiamento 001.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Souza VAS, Andrade CD; **Redação – Primeira versão:** Souza VAS, Silva FP; **Metodologia:** Souza, VAS; **Redação – Revisão & Edição:** Souza VAS, Silva FP, Andrade CD, Rudke AP, Rotunno Filho OC, Moreira DM; **Supervisão:** Rotunno Filho OC, Moreira DM.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; RASCON, N. J. L.; LIMA, E. P. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 354–358, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400004>
- ARAGÃO, L.E.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transaction of the Royal Society London Biological Sciences**, 363(1498), 1779–1785, 2008. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>
- ARAGÃO, R.; SANTANA, G.R.; COSTA, C.E.F.F.; CRUZ, M.A.S.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 17(3): 243–252, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000300001>
- BEIJO, L. A.; MUNIZ, J. A.; CASTRO NETO, P. Tempo de retorno das precipitações máximas em Lavras (MG) pela distribuição de valores extremos do tipo I. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 657–667, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000300022>
- CAMPOS, A.R.; SANTOS, G.G.; ANJOS, J.C.R.; ZAMBONI, D.C.S.; MORAES, J.M.F. Equações de intensidade de chuvas para o estado do Maranhão. **Engenharia na Agricultura**, 23(5): 435–447, 2015. <https://doi.org/10.13083/1414-3984/reveng.v23n5p435-447>
- CAMPOS, A.R.; SANTOS, G.G.; SILVA, J.B.L.; FILHO, J.I.; LOURA, D.S. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, 45(3): 488–498. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000300008>

- CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N.; BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da Desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 22, n. 1, p. 131-140, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100018>
- CETESB. COMPANHIA DE T, 2014ECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo, 1979. 476 p.
- CORREA, S. W. et al. Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 549, p.667-684, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.019>
- DINKU T, FUNK C, PETERSON P, MAIDMENT R, TADESSE T, GADAIN H, CECCATO P. Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. **Q J R Meteorol Soc**. 2018; 1:1–21. <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- GARCIA, S.S.; AMORIM, R.S.S.; COUTO, E.G.; STOPA, W.H. 2011. Determinação da equação intensidade-duração-frequência para três estações meteorológicas do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15(6): 575-581, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600006>
- GUMBEL, E. J. **Statistics of extremes**. New York: Dover Publications, 2004.
- LORENZONI, M.Z.; PRADO, G.; REZENDE, R.; MALLER, A.; OLIVEIRA, J.M. Chuvas intensas para a microrregião de Cianorte/PR, Brasil: uma avaliação a partir da desagregação de chuvas diárias. **Enciclopédia Biosfera**, 9(17): 656-669, 2013.
- MALHADO, A.C.M.; LADLE, R.J.; FABRÉ, N.N.; MALHI, Y.; WHITTAKER, R.J.; LADLE, R.J.; ARAGÃO, L.E.; TERSTEEGE, H.; PHILLIPS, O.; LAURANCE, W.F. Drip-tips are Associated with Intensity of Precipitation in the Amazon Rain Forest. **Biotropica**, 44 (6): 728–737, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00868.x>
- OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃO, P. A.; CARVALHO, D. F. Estimativa das equações de chuvas intensas para algumas localidades no estado de Goiás pelo método da desagregação de chuvas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 23-27, 2000.
- OLIVEIRA, L. F. C.; VIOLA, M. R.; PEREIRA, S.; MORAIS, N. R. Modelos de predição de chuvas intensas para o estado do Mato Grosso, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 274-290, 2011. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.553>
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- SAATCHI, S.; BUERMANN, W.; TERSTEEGE, H.; MORI, S.; SMITH, T. B. Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements. **Remote Sensing of Environment**, 112 (5)2000-2017, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.008>
- SILVA, B.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, F.B.; ARAÚJO FILHO, P.F. Chuvas Intensas em Localidades do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 17(3): 135-147, 2012. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p135-147>
- SOUZA, V.A.S.; NASCIMENTO, R.K.; FURTADO, R.S.; ROSA, A.L.D. Análise de eventos pluviométricos extremos no município de Ji-Paraná, Rondônia. **Revista Pesquisa & Criação**, 10(2): 139-151, 2011.
- TEODORO, P.E.; NEIVOCK, M.P.; MARQUES, J.R.F.; FLORES, A.M.F.; RODRIGUES, C.C.B. Influência de diferentes coeficientes de desagregação na determinação de equações IDF para Aquidauana/MS. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 9(2): 1-9, 2014. <https://doi.org/10.5216/reec.v9i2.28701>
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.
- ZHONG, L.; OSTRENGA, D.; TENG, W. L.; TRIVEDI, B.; KEMPLER, S. Newly Released TRMM Version 7 Products, Other Precipitation Datasets and Data Services at NASA GES DISC. **Report number GSFC.CPR.5969.2012, ID: 20120008258, NASA - Goddard Space Flight Center**, Janeiro de 2012.