

Analysis of spatial interpolation methods for intensity-duration-frequency curves in the Madeira river watershed

Fabíola S. da Silva*, Adria L. de M. Cordeiro*, Carlos E. A. de S. Costa*, Gabriela R. A. da Silva*

*Universidade Federal do Pará, Belém - PA, Brasil. E-mails: fabiolasdsilva@gmail.com, adrialmc@gmail.com, eduardoaguiarsc@hotmail.com, gabrielarousiabdon@gmail.com

Received 22 September 2021; accepted 18 November 2021

Abstract

The maximum rainfall data result in several applications in the field of water resources engineering and can be used as a basis for the dimensioning of hydraulic works. Its spatialization and the realization of interpolation methods are of enormous importance for the Amazon, with many isolated areas that make it difficult to implement measurement tools. Thus, the objective of the research was to generate maps with the spatialization of intensity, duration and frequency (IDF) curves for the Madeira River basin, using the Bell methods together with the Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging (KRG). The results obtained by the IDW methods showed that there is the formation of “islands” in the spatialization maps. The maps interpolated by KRG showed greater smoothing in isohyets and more regular lines, allowing a better identification of intensity ranges. The KRG method presented, for the Madeira River basin, better interpolation results than the results presented by the IDW method, mainly in the identification of differences between return times and duration. It is concluded that performing the spatialization of IDF curve data in a hydrographic basin is a tool that can help in a better management of water resources, for the development of future works in regions where there is no monitoring of rainfall data.

Keywords: Geoprocessing, IDW, Kriging, Bell method.

Análise de métodos de interpolação espacial para curvas de intensidade-duração-frequência na bacia hidrográfica do rio Madeira

Resumo

Os dados de precipitações máximas resultam em diversas aplicações no campo da engenharia de recursos hídricos, podendo ser utilizadas como base para o dimensionamento de obras hidráulicas. Sua espacialização, e a realização de métodos de interpolação são de uma enorme importância para a Amazônia, com muitas áreas isoladas que dificultam a implantação de ferramentas de medição. Desta forma, o objetivo da pesquisa foi a geração de mapas com a espacialização das curvas de intensidade, duração e frequência (IDF) para a bacia hidrográfica do rio Madeira, utilizando os métodos de Bell juntamente com o método *Inverse Distance Weighting* (IDW) e Krigagem (KRG). Os resultados obtidos pelos métodos IDW mostraram que há a formação de “ilhas” nos mapas de espacialização. Os mapas interpolados por KRG apresentaram maior suavização nas isoietas e linhas mais regulares, possibilitando uma melhor identificação das faixas de intensidade. O método KRG apresentou, para a bacia hidrográfica do rio Madeira, resultados de interpolação melhores que os resultados apresentados pelo método IDW, principalmente na identificação das diferenças entre os tempos de retorno e duração. Conclui-se que realizar a espacialização de dados de curva IDF em uma bacia hidrográfica é uma ferramenta que pode auxiliar numa melhor gestão dos recursos hídricos, para o desenvolvimento de futuras obras em regiões onde não há o monitoramento de dados pluviométricos. Palavras-chave: Geoprocessamento, IDW, Krigagem, Método de Bell.

1. Introdução

Conhecer as precipitações máximas resulta em diversas aplicações no campo da engenharia de recursos hídricos, podendo ser utilizada como base para o dimensionamento de obras hidráulicas, tais como canais, bueiros e vertedores (Coelho Filho, 2017). Segundo Silva et al. (2018) e Gardiman et al. (2012), para a caracterização das precipitações é necessário conhecer a sua intensidade, duração e

frequência de ocorrência em determinado período de retorno (curvas IDF), pois essas informações permitem projetar, de forma mais segura, estruturas hidráulicas como barragens; canais escoadouros, obras de drenagem, projetos de irrigação e projetos agrícolas. Para Rangel et al. (2017) a precipitação é a variável climática com a maior variabilidade nas mais diversas escalas de tempo, sendo a precipitação máxima definida como a ocorrência extrema de um evento ou conjunto de eventos, com duração,

distribuição temporal e espacial críticas para uma área ou bacia hidrográfica.

Um método capaz de identificar as variáveis de intensidade, duração e frequência das precipitações é o de Bell (1969). Este, consiste na associação da altura pluviométrica de uma chuva intensa para um tempo de duração padrão de 60 minutos e período de retorno de dois anos, sendo baseado em dados de séries parciais de chuvas observadas em várias localidades do mundo. Segundo Back (2009), o fundamento do estudo de Bell (1969) é a semelhança existente entre os mecanismos das tormentas, ou seja, o valor máximo dessas chuvas associa-se a células convectivas que possuem características em comum em algumas partes do mundo. Para Almeida, Reis e Mendonça (2017), esse método é empregado quando não se dispõem de registros pluviométricos, o que o torna um dos mais utilizados no Brasil, por conta da limitada disponibilidade, inexistência ou falhas nestes registros.

Por sua vez, outro grande problema para o país seria a espacialização dos poucos dados que são disponíveis. Felizardo (2016) relata que como modo de integrar estes poucos dados hidráulicos e hidrológicos com a gestão de riscos de inundações, pode-se utilizar como ferramenta o Sistema de Informações Geográficas (SIG). O aprimoramento das técnicas de geoprocessamento possibilita a aplicação de geoestatística à modelagem de dados espaciais, permitindo transformar dados discretos em contínuos por meio de interpolação matemática aos dados pontuais, de área e de superfície, contribuindo para enriquecer a disponibilidade de discussões em diversos estudos (Lucas et al., 2013).

Dentre os métodos determinísticos de interpolação, destaca-se o de Ponderação do Inverso das Distâncias (Inverse Distance Weighting - IDW), onde o último implementa explicitamente o pressuposto de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes. Para prever um valor para algum local não medido, o IDW usará os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, onde essa influência é inversamente proporcional à distância, como é explicado por Zhou et al. (2021).

Já o método de Krigagem (KRG), que é um interpolador probabilístico (Alves e Krueger, 2020), é considerado um interpolador mais complexo em relação aos outros, pois ele utiliza a geoestatística para fazer o processo de interpolação. A diferença desse método em relação aos outros é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras, enquanto no IDW os pesos são ajustados pelo inverso do quadrado da distância, a Krigagem utiliza os pesos

a partir do semivariograma (Camargo et al., 2004), o que possibilita a estimativa do grau de dependência espacial entre os pontos (Brubacher et al., 2020).

Na Amazônia, os pluviômetros, que tradicionalmente são utilizados para medir a precipitação por oferecerem bons resultados, não são amplamente usados devido a existência de muitas áreas isoladas que dificultam a implantação dessa ferramenta. Desta maneira, os métodos de interpolação se apresentam como ferramentas de grande relevância, principalmente quando se faz necessário a realização de estudos hidrológicos em regiões isoladas com dificuldades de obtenção de dados (Limberger e Silva, 2018).

O rio Madeira é o mais longo e importante afluente do Amazonas (Gomes et al., 2019), destacando-se também devido a sua importância ambiental e sua essencialidade para a economia de muitas regiões por proporcionar a pesca e o transporte hidroviário. Nesta região existe o Complexo Hidrelétrico do rio Madeira, o qual é composto pelas Usinas Hidrelétricas de Jirau e de Santo Antônio (ANA, 2020), se mostrando assim, uma área de alta relevância para estudos hidráulicos e hidrológicos. Desta forma, o objetivo da pesquisa foi a geração de mapas com a espacialização das curvas IDF para a bacia hidrográfica do rio Madeira, utilizando os métodos de Bell juntamente com o método IDW e Krigagem, identificando a intensidade, duração e frequência para áreas isoladas que não possuem pluviômetros ou pluviógrafos.

2. Material e métodos

Área de estudo

O rio Madeira é um dos principais afluentes do rio Amazonas com extensão total de aproximadamente 3.315 km², sua área de drenagem representa mais de 20% de toda a bacia amazônica, estendendo-se por três países, com 51% de sua área no Brasil, 42% na Bolívia e 7% no Peru (Goulding et al., 2003) (Figura 1). A bacia do rio Madeira possui área de drenagem de 1.420.000 km², precipitação média anual de 1.834 mm e vazão média anual de 31.704 m³/s (15% da descarga da Bacia do Rio Amazonas), e se caracteriza por um clima quente e úmido (clima equatorial) com temperatura média anual variando entre 24 e 26 °C na planície Amazônica (Rodríguez, et al. 2017).

Além da importância ambiental, ela é considerada essencial para a economia de muitas regiões, pois, tradicionalmente, proporciona a pesca, o transporte hidroviário e, em suas margens, o plantio de diversos produtos agrícolas. Um dos seus usos importantes é o trecho navegável, entre Porto Velho e a Foz do Rio Amazonas, sendo considerado um importante canal de integração e comércio da região

Norte. Há também um complexo hidrelétrico, composto por duas usinas de grande porte: usina hidrelétrica de Jirau e Santo Antônio, ambas são

responsáveis pela geração de 7000 MW para as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil a partir de Porto Velho (CEMADEN, 2019).

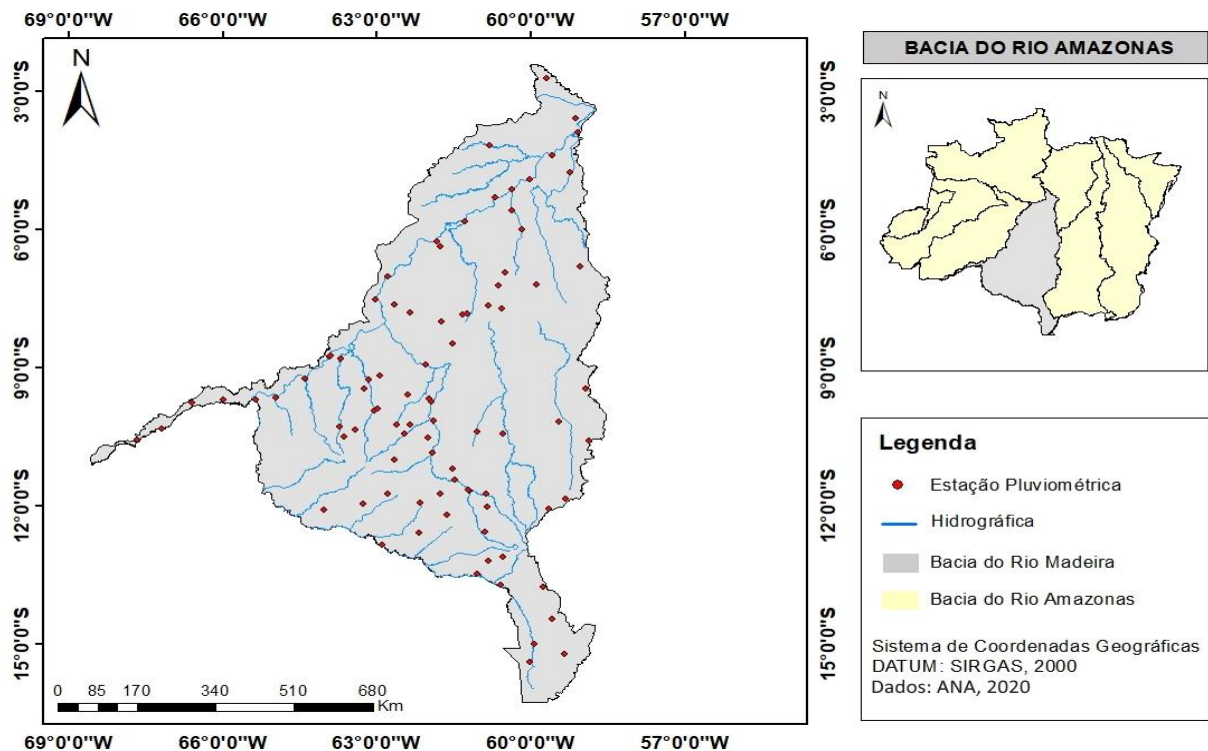


Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Madeira, Estados do Amazonas e Rondônia.

Dados

Foram utilizados dados de precipitação diária de 42 estações pluviométricas, obtidas junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Essas estações são apresentadas na Tabela 1. Foi aplicado o método de Bell para obtenção das curvas IDF. Para esse método foram utilizadas as precipitações máximas estimadas pela distribuição de Gumbel para os períodos de retorno de 2 e 50 anos (curto e longo prazo). Em seguida, os valores de intensidade de precipitação foram interpolados utilizando-se o método de IDW e Krigagem, gerando dessa forma um mapeamento das intensidades por toda a bacia hidrográfica do rio Madeira.

Método de Bell

Para determinar a precipitação máxima, utiliza-se o método de Bell (1969) que associa a altura pluviométrica de uma chuva intensa para um tempo de duração e período de retorno padrão de 60 min e dois anos, conforme descrito na Equação 1.

$$h_{(t;TR)} = (\alpha \times \ln(TR) + \beta_1) + (\beta_2 \times t^\gamma - \beta_3) \times h_{(60;2)} \quad (1)$$

Onde:

$h_{(t;TR)}$ - Altura pluviométrica (mm) de chuva intensa de duração “t” e período de retorno “TR”;

$h_{(60;2)}$ - Altura pluviométrica (mm) de chuva intensa, padrão de 60 min de duração e dois anos de período de retorno;

t – Duração (min);

TR – Período de retorno (ano);

α , γ , β_1 , β_2 e β_3 - Parâmetros regionais ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

Bertoni e Tucci (1993), recomendam que o método de Bell seja aplicado em chuvas com durações menores que 120 min e períodos de retorno inferiores a 20 anos. Seguindo esta recomendação determinaram-se as intensidades e alturas pluviométricas máximas para os tempos de duração de 5, 10, 15, 20, 25 30 e 60 min. A equação utilizada foi ajustada por Bell com dados de vários continentes (Equação 2).

$$h_{(t;TR)} = (0,35 \times \ln(TR) + 0,76) + (0,54 \times t^{0,25} - 0,50) \times h_{(60;2)} \quad (2)$$

Onde:

$h_{(t;TR)}$ - Precipitação estimada (mm) de chuva intensa de duração “t” e período de retorno “TR”.

Tabela 1 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

n	Código	Nome	Latitude	Longitude
1	359001	Nova Olinda do Norte	-3,88	-59,09
2	459000	Borba	-4,39	-59,60
3	560000	Novo Aripuanã	-5,12	-60,38
4	658000	Santarém Sucunduri	-6,80	-59,04
5	660000	Seringal Jenipapo	-6,00	-60,19
6	661000	São Rafael	-6,25	-61,84
7	661001	Nova Esperança	-6,36	-61,77
8	759000	Vila do Apui	-7,20	-59,89
9	760000	Prainha Velha	-7,21	-60,64
10	760001	Boca do Guariba	-7,71	-60,58
11	763001	Humaitá	-7,52	-63,03
12	862000	Tabajara	-8,93	-62,06
13	961003	Fábio (Boliche)	-9,68	-61,98
14	962000	Mineração Oriente Novo	-9,59	-62,39
15	963000	Ariquemes	-9,93	-63,06
16	963001	Santo Antônio Br-364	-9,26	-63,16
17	963004	Fazenda Rio Branco	-9,89	-62,99
18	965001	Abunã	-9,70	-65,36
19	966000	Nova Califórnia	-9,76	-66,61
20	966001	Pedreiras	-9,69	-65,99
21	1058005	Vale Do Natal	-10,59	-58,87
22	1059000	Humboldt	-10,18	-59,45
23	1061003	Rondominas (Barrocas)	-10,52	-62,00
24	1062001	Jaru	-10,45	-62,47
25	1062002	Seringal 70	-10,24	-62,63
26	1062003	Mirante da Serra	-11,00	-62,66
27	1062004	Theobroma	-10,24	-62,35
28	1063000	Escola Caramurú	-10,51	-63,65
29	1063001	Mineração Ponte Massangana	-9,76	-63,29
30	1160000	Marco Rondon	-12,02	-60,86
31	1160002	Fazenda Flor do Campo	-11,75	-60,87
32	1161000	Vista Alegre	-11,44	-61,48
33	1161001	Pimenta Bueno	-11,68	-61,19
34	1161002	Rolim de Moura	-11,75	-61,78
35	1262000	Pedras Negras	-12,85	-62,90
36	1359001	Vila Alegre	-13,78	-59,77
37	1360000	Colorado do Oeste	-13,11	-60,55
38	1360001	Cerejeira	-13,20	-60,82
39	1360002	Pimenteiras	-13,48	-61,05
40	1559000	Pontes e Lacerda	-15,22	-59,35
41	1559006	Mato Grosso	-15,01	-59,95
42	1560000	Fazenda Areião	-15,40	-60,03

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2020).

Interpolação

A elaboração dos mapas das curvas IDF's da bacia hidrográfica do rio Madeira ocorreu a partir da análise geoestatística com auxílio do software de geoprocessamento, com adoção da projeção Universal Transversal de Mercator (UTM). A técnica de geoestatística utilizada foi a interpolação pelos métodos de Krigagem (KRG) e IDW. De acordo com Lucas et al. (2013), os interpoladores são ferramentas matemáticas que atribuem valores relativos a alguma

variável a pontos inseridos em um campo de valores já existentes ou banco de dados construídos a partir de observações sistemáticas e georreferenciadas.

O método IDW é capaz de realizar a estimativa da variável ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos postos mais próximos, o que é função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado (Jimenez; Domecq, 2008). Esse método

simples é recomendado para regiões com alta densidade de amostras (Deus et al., 2010). Para Watson e Philip (1985) e Mello et al. (2003), este interpolador é largamente utilizado com o expoente dois, com bons resultados, e com o qual recebe a denominação de inverso do quadrado da distância (IQD). Sua expressão está apresentada na Equação 3.

$$P_{est} = \frac{\sum_{i=1}^{15} P_{obs_i} \cdot d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^{15} d_i^{-2}} \quad (3)$$

Onde:

P_{obs} - Precipitação observada (mm);

P_{est} - Precipitação estimada (mm);

d - Distância euclidiana entre a posição p a ser estimada e o i -ésimo local amostrado.

O interpolador Krigagem é baseado numa função contínua, que explica o comportamento de uma variável nas distintas direções de um espaço geográfico. Permite associar a variabilidade da estimação com base na distância que existe entre um par de pontos, pelo uso de um semivariograma, o qual permite verificar o nível de similitude que existe entre estes, à medida que se afastam (Gallardo, 2006).

É um método estimador que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas. Para isso, deve existir uma certa continuidade espacial, de modo a permitir que os dados obtidos por

amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido.

Segundo Wanderley et al. (2012), a Krigagem se destaca de outros métodos por possibilitar a análise da variância dos dados através da análise variográfica, o que demonstra a descontinuidade espacial da amostra. A KRG pode ser entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em consideração a dependência estocástica dos dados distribuídos no espaço georreferenciado.

3. Resultados e discussão

Realizar a espacialização de dados pluviométricos é uma forma de complementação de dados climáticos inexistentes em determinadas regiões, auxiliando no entendimento do comportamento hidrológico de uma área.

Os resultados obtidos pelos métodos IDW mostraram que há a formação de “ilhas” nos mapas de espacialização (Figura 2). Para Ferreira Filho et al. (2019), a geração desses contornos acontece em razão do caráter estatístico do método, visto que, a influência de cada ponto tende a ter um raio de ação definido de forma igual em todas as direções, o que possibilita a formação de círculos.

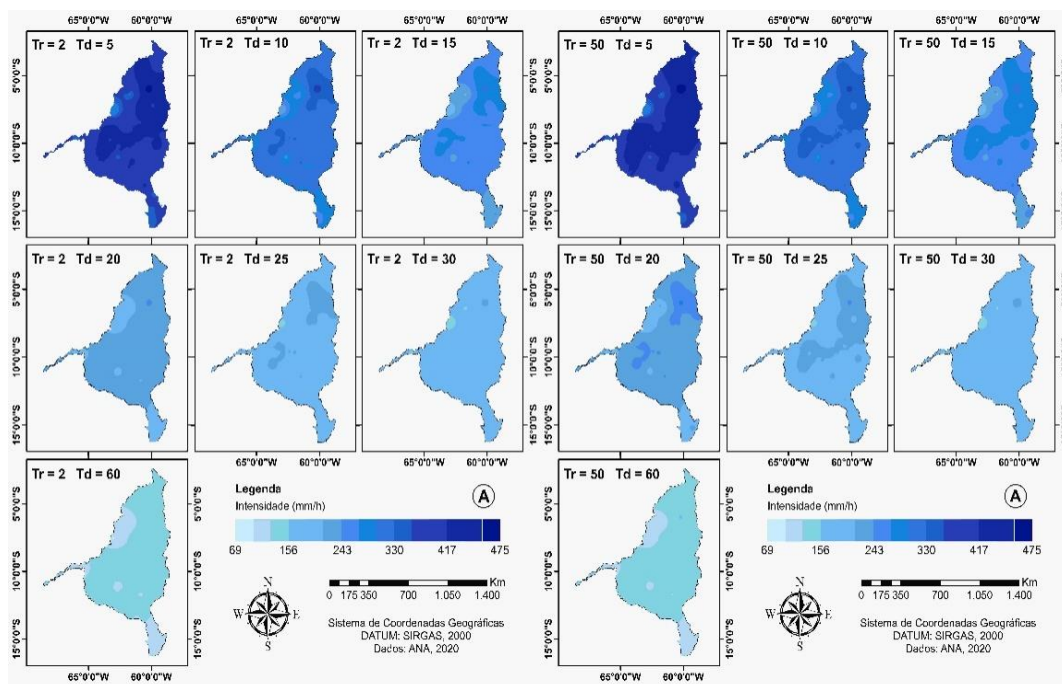


Figura 2- Método de Bell para tempo de retorno de 2 e 50 anos interpolado pelo método de IDW respectivamente.

Na espacialização das médias anuais de chuva realizada por Nogueira et al. (2020) os

resultados obtidos pelo método IDW também apresentaram a formação de ilhas no mapa gerado,

concordando com os resultados obtido. Murara (2019) infere que a qualidade da interpolação pelo método IDW pode diminuir se a distribuição de pontos amostrais é irregular. Justificando a ocorrência da formação de “ilhas” na espacialização realizada para a bacia hidrográfica do Rio Madeira.

Para Marcuzzo et al. (2011) isso ocorre devido à distância do ponto a ser interpolado, em relação a um ponto com dados, tende a zero, o peso da influência desse ponto sobre o ponto a ser interpolado tende a infinito.

A região ao redor de um ponto com dados será influenciada praticamente apenas por ele, podendo gerar tais “ilhas” ao redor de pontos de dados. Quanto maior for a distância entre a amostra e o ponto a ser estimado, menor será a influência da amostra, e ainda se existirem duas amostras com valores discrepantes, a superfície torna-se pouco suavizada (Anjos et al., 2017).

A espacialização pelo método IDW da intensidade da precipitação para a bacia hidrográfica do rio Madeira pelo método de Bell apresentou semelhança nas curvas dos mapas gerados, mesmo

com as diferenças na duração (Td). E isso pode ser justificado devido o método IDW consistir na ponderação dos pesos a cada um dos postos mais próximos, e como para todos os mapas foram utilizadas as mesmas estações pluviométricas, ocorreu a semelhança entre as curvas geradas pelos gráficos.

Pode-se chamar este fato de “ilhas de intensidade pluviométrica”, já que este método se aproxima muito ao que é utilizado para elaborar e delimitar “ilhas de calor” em centros urbanos, onde a semelhança de curvas de nível em topografias de ilhas marítimas com o campo formado pelo calor distribuído no centro das grandes cidades levou a designar tal nome (Abreu et al., 2021).

Importante ressaltar também a diferença entre os TR, no qual o resultado para longo prazo (50 anos) apresentou uma espacialização maior da menor intensidade (azul mais claro), diferente do que ocorre com o KRG (Figura 3), o que pode apresentar novamente uma evidência de que a distância entre as estações deve ser analisada e utilizada com o máximo de cautela.

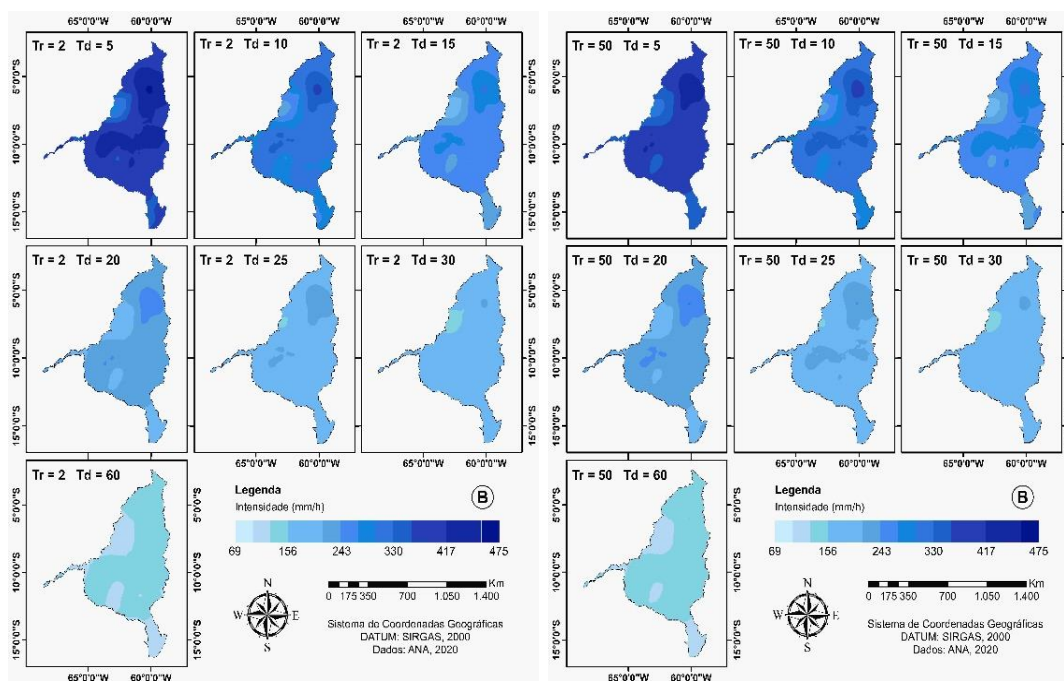


Figura 3- Método de Bell para tempo de retorno de 2 e 50 anos interpolado pelo método de KRG respectivamente.

Os mapas interpolados por KRG apresentaram maior suavização nas isoietas e linhas mais regulares, possibilitando uma melhor identificação das faixas de intensidade. Para Murara (2019) a KRG apresenta um ótimo desempenho por realizar uma transição mais homogeneia entre diferentes zonas pluviométricas.

No estudo de Lucas, et al. (2013) o método KRG foi qualificado como o melhor interpolador e seus resultados mostram uma melhor suavização da

espacialização do método KRG em relação ao IDW, o que corrobora com diversos estudos, incluindo o de Leite et al. (2020), onde os autores encontraram coeficientes de eficiência mais elevados para o KRG quando comparado ao IDW ou método “Spline”.

Por outro lado, importante ressaltar que isto é no caso para esta região e para este objetivo, pois o IDW é bastante utilizado e possui uma eficiência amplamente comprovada em, por exemplo,

preenchimentos de falhas quando comparado com outros (Ely et al., 2021).

A espacialização pelo método KRG para a curva IDF pelo método de Bell também apresentou semelhanças nas curvas de intensidade que foram geradas de um mapa para o outro, consequência também da utilização das mesmas estações.

Segundo Ikechukwu et al. (2017) o método de KRG apresenta uma boa eficácia. Para Ferreira Filho et al. (2019) a KRG é um método geoestatístico baseado na teoria das variáveis regionalizadas, onde a variação espacial de um fenômeno é estatisticamente homogênea em uma determinada área, o que pode justificar alguns erros com relação aos dados.

No método IDW apresentado na Figura 2 a faixa de maior intensidade apresentou maior frequência na bacia hidrográfica para Tr de 2 anos, diferente do Tr de 50 anos onde as faixas com maior ocorrência foram as que tinham menor intensidade de chuva. Para o método de KRG a intensidade que apresentou maior predominância ao longo da bacia foram as faixas intermediárias como pode ser observado na Figura 3, para os dois tempos de retorno.

Importante ressaltar que o processo de representação cartográfica se mostra de grande importância para representar o melhor entendimento da variabilidade espacial da intensidade de precipitação em uma bacia hidrográfica e para isso é necessário selecionar um método que melhor apresente a variabilidade espacial destes eventos.

Não há um consenso geral, que indique qual melhor método de interpolação para representar eventos de chuva, pois pode depender do número de amostras e qualidade de dados. Porém assim como para Anjos et al. (2017) e Ferreira Filho et al. (2019) o método KRG apresentou, para a bacia hidrográfica do rio Madeira, resultados de interpolação melhores que os resultados apresentados pelo método IDW.

4. Conclusão

A distância entre as estações foi algo determinante na diferença de resultados, como o KRG sendo superior ao IDW, porém, em um ambiente urbano por exemplo, densamente ocupado, o entendimento da distribuição da chuva numa escala cartográfica é igualmente importante, justamente para que os efeitos negativos à população possam ser evitados através de um planejamento eficaz do sistema de drenagem urbana. O método KRG apresentou, para a bacia hidrográfica do Rio Madeira, resultados de interpolação melhores que os resultados apresentados pelo método IDW.

Quando comparado os resultados obtidos pelos dois métodos, se observa que para o mesmo TR e Td, áreas semelhantes da bacia hidrográfica

possuem faixas de intensidade com variações próximas. É possível concluir que os dois métodos são satisfatórios para a obtenção de intensidade de chuva e a geração das curvas IDF, pois na validação dos métodos, mesmo diferindo entre si na visualização da espacialização da intensidade, não apresentam resultados com tanta discrepância. Para o método IDW e KRG a intensidade das precipitações foram se tornando maiores conforme o aumento do tempo de retorno. E para cada tempo de retorno as intensidades foram reduzindo à medida que o tempo de duração da precipitação crescia.

Espera-se que esses dados e essas conclusões enriqueçam ainda mais as informações sobre sensoriamento remoto na Amazônia, e principalmente na bacia do Rio Madeira. A área sofre com carência de infraestruturas, planejamentos técnicos e políticas públicas voltadas para remediação de riscos climáticos. Com a utilização do geoprocessamento em conjunto com variáveis de projetos hidráulicos, pode-se obter dados que otimizem obras, evitando gastos desnecessários e possíveis adversidades, dando suporte aos gestores.

Referências

- Abreu, L.P., Moraes, R.C.S., Santos, R.E.C.dos, 2021. Geotecnologias para Avaliação da Ocorrência de Ilhas de Calor na Cidade de Corrente, Piauí. *Revista da Academia de Ciências do Piauí* 2, 105-122.
- Almeida, K.N.D., Reis, J.A.T.D., Mendonça, A.S.F., 2017. Use of the expedited methods of Chow-Gumbel and Bell for formulation of intense rain equations-a performance evaluation. *Revista Ambiente & Água* 12, 203-214.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2020. Portal HidroWeb. Disponível: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso: 1 fev. 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2020. Sala de Situação. Disponível: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/rio-madeira/saiba-mais>. Acesso: 18 maio 2020.
- Alves, S.C., Krueger, C.P., 2020. Investigação da variação volumétrica de reservatório de abastecimento de água mediante o emprego de diferentes espaçamentos entre as linhas regulares de sondagem. *Revista Brasileira de Cartografia* 72, 365-383.
- Anjos, R.S., Candeias, A.L.B., Nóbrega, R.S., 2017. Mapeamento da precipitação estimada e observada no semiárido pernambucano e sua relação com a modelagem de dados espaciais. *Revista Brasileira de Cartografia* 69, 447-462.

- Back, A.J., 2009. Relationships between heavy precipitations of different durations in the municipality of Urussanga, SC/Relações entre precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Urussanga, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 170-176.
- Bell, F.C., 1969. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. *Journal of the Hydraulics Division* 95, 311-328.
- Bertoni, J.C., Tucci, C.E.M., 1993. Precipitação, in: Tucci, C.E.M. (Org.), *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, pp. 177-231.
- Brubacher, J.P., Oliveira, G.G.D., Guasselli, L.A., 2020. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Meteorologia* 35, 615-629.
- Camargo, E.C.G., Fucks, S.D. Câmara, G., 2004. Análise espacial de superfícies. *Análise espacial de dados geográficos*. Embrapa Cerrados, Planaltina, pp. 79-122.
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, 2019. Site: <https://www.cemaden.gov.br/13042018-previsao-de-vazao-para-bacia-do-rio-madeira/>. Acesso: 18 maio 2019.
- Coelho Filho, J.A.P., Melo, D.D.R., Araújo, M., 2017. Intense rainfall study of Goiânia/GO by modeling maximum annual events using Gumbel and Generalized Extreme Value distributions. *Ambiência* 13, 75-88.
- Deus, B.V., Zeilhofer, P., Araújo, G.C., Santos, A.S.L., 2010. Interpolação pluviométrica na bacia do alto e médio rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. *Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife.
- Felizardo, L.M., 2016. Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana. *Dissertação (Mestrado)*. São Paulo, Unesp.
- Ferreira Filho, D.F., Bezerra, P.E.S., da Silva, M.D.N.A., Rodrigues, R.S.S., Figueiredo, N.deM., 2019. Aplicação de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas da rede hidrográfica: estudo de caso calha norte-PA. *Revista Brasileira de Climatologia*, 24, 277-299.
- Gallardo, A., 2006. *Geostatística*. Ecosistemas 15, 1-11.
- Gardiman, B.S., Magalhães, I.A.L., Freitas, C.A.A.de, Cecílio, R.A., 2012. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES) Analysis of interpolation techniques for spatial rainfall distribution in river basin Itapemirim (ES). *Ambiência* 8, 61-71.
- Gomes, D.C., Ferreira, N.S., Lima, A.M.M., Serrão, E.A.deO., 2019. Variabilidade espaço-temporal da precipitação: Bacia Hidrográfica do rio Madeira. *Revista Geográfica Acadêmica* 13, 90-104.
- Goulding, M., Barthelm, R., Ferreira, E.J., 2003. *The Smithsonian Atlas of Amazon*. Princeton Editorial Associates, Smithsonian Institution, Washington.
- Ikechukwu, M.N., Ebinne, E., Idorenyin, U., Raphael, N.I., 2017. Accuracy assessment and comparative analysis of IDW, spline and kriging in spatial interpolation of landform (topography): an experimental study. *Journal of Geographic Information System* 9, 354.
- Jimenez, K.Q. Domecq, F.M., 2008. Estimación de Chuva usando Métodos de Interpolación. *Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre*.
- Lucas, T.P.B., Plec, D., Abreu, M.L., Parizzi, M.G., 2013. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. *Revista Brasileira de Climatologia*, 13, 7-21.
- Leite, I.V., de Almeida, A.Q., Loureiro, D.C., Souza, R.M.S., Gonzaga, M.I.S., Pereira, D.dosR., Santos, A.deA., 2020. Avaliação de métodos de interpolação em dados de batimetria na barragem do rio Poxim-Açu-SE. *Research, Society and Development* 9, e690997755-e690997755.
- Limberger, L., Silva, M.E.S., 2018. Precipitação observada na Amazônia Brasileira: Redes convencionais e dados da Reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 20-37.
- Marcuzzo, F.F.N., Andrade, L.R., Melo, D.C.D.R., 2011. Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do estado do Mato Grosso.
- Mello, C.D., Lima, J.M., Silva, A.M., Mello, J.M., Oliveira, M.S., 2003. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27, 925-933.
- Murara, P.G., 2019. Técnicas de Interpolação para a pesquisa em climatologia regional e agroclimatologia. *Revista Brasileira de Climatologia* 25, 106-126.
- Nogueira, D.B., da Silva, A.O., Silva, A.P.N.da, 2020. Comparação entre métodos de interpolação espacial para a estimativa da distribuição de precipitação no Ceará-Crasil. *Irriga* 25, 131-142.
- Rangel, E.M., Hartwig, M.P., 2017. Análise das curvas de intensidade-duração-frequência para a cidade de Pelotas através de uma função de desagregação. *Revista Thema* 14, 63-77.

- Rodriguez, D.A., Lopes, L.G., Carriello, F., Júnior, J.L.S., Pinto, G.L., Tomasella, J., Chou, S.C., 2017. Previsões de cheias extremas nos horizontes sazonais e de curto e médio prazos na bacia do rio Madeira: estudo de caso da enchente de 30 de março de 2014 em Porto Velho. *Revista Brasileira de Cartografia* 69, 827-836.
- Silva, J.B.L., Cândido, F.A., Pires, L.C., França, L.C.deJ., 2018. Nota técnica: Equações de intensidade, duração e frequência de chuvas máximas para o estado do rio grande do norte, brasil. *Revista Engenharia na Agricultura* 26, 160-170.
- Wanderley, H.S., Amorim, R.F.C.D., Carvalho, F.O.D., 2012. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27, 347-354.
- Watson, D.F., Philip, G.M., 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing* 2, 315-327.
- Zhou, M., Li, K., Pan, M., Chen, J., Li, C., Chen, L., 2021. An Improved Temperature Spatial Interpolation Method for Spaceborne LIDAR Atmospheric Correction. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4, 83-88.