

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CHUVA E O EFEITO SOBRE A SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA – ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIACHO FUNDO – DF

SPATIAL DISTRIBUTION OF RAINFALL AND THE EFFECT ON HYDROLOGICAL SIMULATION - A CASE STUDY IN THE RIACHO FUNDO BASIN - DF

Gabriela Larissa Silva^a, Daniela Junqueira Carvalho^a, Sergio Koide^a

^aUniversidade de Brasília – UnB

gabrielalarissa.silva1@gmail.com, d.junqueirac@gmail.com, skoide@unb.br

Submissão: 31 de julho de 2022

Aceitação: 25 de julho de 2023

Resumo

A precipitação representa a entrada de água na bacia hidrográfica e determinar sua distribuição espacial é uma atividade complexa visto que o monitoramento é realizado, em geral, de maneira pontual. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de métodos de interpolação dos dados para uso em simulação hidrológica. Neste trabalho, foram avaliados 2 eventos de chuva distintos, ocorridos na bacia do Riacho Fundo, no Distrito Federal (DF), no período chuvoso entre 2019 e 2020, com respostas similares de vazão no exutório da bacia. Foram utilizados dados de monitoramento de chuva e vazão provenientes de 14 pluviômetros e 1 linígrafo de pressão. A interpolação espacial permitiu verificar que os dois eventos de chuva tiveram comportamentos espaciais distintos, evidenciando que o hidrograma no exutório não é suficiente para explicar a chuva na área da bacia. As simulações, realizadas no *Storm Water Management Model* (SWMM) utilizando as chuvas médias calculadas pelos polígonos de Thiessen, para a área total da bacia e para as sub-bacias resultantes da divisão da área, mostraram a influência da discretização espacial da chuva por sub-bacia quando comparado à consideração de precipitação média para toda a área. Dessa forma, constata-se que a obtenção de dados de entrada para simulações em modelos de chuva-vazão requer a existência de monitoramento extensivo da chuva na bacia, mesmo para bacias relativamente pequenas como a estudada (213 km²).

Palavras-chave: Monitoramento de chuva; interpolação espacial; krigagem ordinária; Polígonos de Thiessen; SWMM.

Abstract

Precipitation represents the water input to the hydrographic basin and determining its spatial distribution is a complex activity since monitoring is done, in general, in a punctual way. Thus, it is necessary to use interpolation methods of the data for use in hydrological simulation. In this work, we evaluated 2 distinct rainfall events that occurred in the Riacho Fundo basin in the Federal District (DF), in the rainy season between 2019 and 2020 with similar flow responses in the basin outflow. Monitoring data of rain and flow was used from 14 rain gauges and 1 pressure transducer level logger were used. The spatial interpolation allowed verifying that the two rainfall events had distinct spatial behaviors, evidencing that the hydrogram at the outflow is not sufficient to explain the rainfall in the basin area. The simulations, carried out in the Storm Water Management Model (SWMM) using the average rainfall calculated by Thiessen polygons for the total basin area and for the sub-basins resulting from the division of the area, showed the influence of the spatial discretization of rainfall per sub-basin when compared to considering the average rainfall for the total area. Thus, it can be seen that obtaining input data for the simulations in rain models requires the existence of extensive rainfall monitoring in the basin, even for basins relatively small like the one studied (213 km²).

Key words: Rainfall monitoring; spatial interpolation; ordinary kriging; Thiessen polygons; SWMM.

1. INTRODUÇÃO

Conhecer o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica é importante para compreendê-la de uma forma abrangente e completa. Especialmente as informações sobre os componentes de precipitação e escoamento superficial permitem planejar o manejo de águas pluviais para uma gestão de recursos hídricos eficiente. A precipitação é a parcela mais representativa do ciclo hidrológico representando a entrada de água na bacia. Compreender a sua variação no tempo e no espaço é complexo e depende de um monitoramento contínuo.

O monitoramento da precipitação, além de ser de extrema relevância para a compreensão da chuva, também é essencial para a elaboração de estudos com modelagem hidrológica, pois essa é uma variável de entrada nos modelos. No entanto, a precipitação é comumente obtida por meio de medições pontuais no espaço, em estações geralmente afastadas entre si, resultando na necessidade de se utilizar métodos de interpolação espacial para converter esses dados em um campo contínuo para realizar o seu mapeamento (CARVALHO; ASSAD; PINTO, 2012). Para espacializar os dados obtidos, utilizam-se diversos métodos de interpolação que permitem a obtenção de precipitações médias, levando em consideração a necessidade de discretização espacial das bacias hidrográficas para a representação das mesmas (VIOLA *et al.*, 2010). Dentre os diversos modelos de interpolação existentes, destacam-se o método geoestatístico da krigagem e o da ponderação pelo inverso da distância (*inverse distance weighting – IDW*), sendo frequentemente utilizado o quadrado da distância na ponderação.

A krigagem ordinária é um método geoestatístico univariado de interpolação que tem sido aplicada em diversos estudos de interpolação de dados pluviométricos (CUNHA *et al.*, 2013). Esse método funciona utilizando a proximidade entre pluviógrafos ou pluviômetros e incorpora pesos diferentes para cada amostra. Dessa forma, apresenta uma correlação espacial representativa permitindo a elaboração de isoietas de chuva. As isoietas são curvas que apresentam o mesmo valor de intensidade pluviométrica, assim sendo uma ótima ferramenta para a compreensão da variação da chuva no espaço, além de permitir a obtenção da chuva média.

A utilização do método do inverso do quadrado das distâncias dá-se geralmente por sua

facilidade de obtenção e possibilidade de comparação com o método da krigagem. Esse método é um interpolador de média que não é exato, utilizando um ponto e atribuindo pesos de maneira fracionária. Assim, quanto menor for a distância entre os pontos, maior será o peso atribuído.

Ainda com relação ao cálculo da precipitação média para uma área, o método de Thiessen é o mais utilizado na prática. Esse método foi desenvolvido pelo meteorologista Alfred H. Thiessen ao aplicar o diagrama de Voronoi (MARCIANO; BARBOSA; SILVA, 2018) e consiste na divisão da área da bacia em polígonos que compreendem a área de influência de cada estação de coleta de dados. A partir disso é atribuído um peso para cada pluviômetro dependendo da parcela que seu polígono correspondente ocupa na área da bacia.

O monitoramento da vazão no exutório também fornece informações valiosas sobre o comportamento hidrológico da bacia, porém, para a compreensão espacial e temporal de um evento chuvoso, ele precisa estar aliado aos dados de monitoramento pluviométrico. Os dados de vazão permitem uma interpretação rápida de qual foi a resposta daquele evento pluviométrico na bacia e a elaboração de hipóteses que expliquem a chuva observada.

Muito frequentemente, para a determinação da chuva média, considera-se a área total de uma bacia hidrográfica. Contudo, apesar de uma bacia representar uma área de captação de chuva que converge todos os escoamentos para o mesmo ponto (exutório), cabe ressaltar que dentro dela há heterogeneidades, especialmente se a bacia apresentar diferentes usos do solo. Dessa forma, a determinação de sub-bacias pode ser necessária caso o objetivo seja uma análise mais acurada do comportamento hidrológico da bacia.

A modelagem computacional é uma ferramenta de importante auxílio para a compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia em resposta a um evento chuvoso. O modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) permite diversas análises, mas tem como principal aplicação a simulação hidrológica de bacias hidrográficas em termos de quantidade e qualidade da água. Esse modelo é mais frequentemente utilizado para simulação de redes de drenagem em áreas urbanas, porém é crescente a necessidade de sua aplicação em bacias de uso do solo misto em grandes centros urbanos. Desse modo, cabe avaliar a

aplicabilidade desse modelo chuva-vazão e de qualidade da água também em áreas rurais ou de uso misto, aliada ao monitoramento pluviométrico e fluviométrico.

A capacidade de representar a variabilidade espacial na entrada dos dados de precipitação reflete nas incertezas da modelagem do escoamento (FAURÈS *et al.*, 1995). Estudos vêm observando que redes de monitoramento com maior densidade de estações pluviométricas em geral levam a menores níveis de incerteza (MEDEIROS; MOREIRA; RIGHETTO, 2007) e melhores performances dos modelos em relação a áreas com rede de menor densidade (MAZZOLENI; BRANDIMARTE; MARANTO, 2019). A utilização de conjunto de múltiplas entradas de dados de precipitação também pode aumentar o nível de confiança dos resultados das simulações, sendo importante considerar a situação da rede de monitoramento e disponibilidade de outros meios de coleta de dados, como radares (STRAUCH *et al.*, 2012). Dessa forma, em locais nos quais está disponível rede de monitoramento com estações pluviométricas, a espacialização das medições pontuais em cada estação e o cálculo de médias podem auxiliar a melhor representar a variabilidade espacial da precipitação para entrada nos modelos hidrológicos e diminuir incertezas associadas a essa variável.

No Distrito Federal (DF), o lago Paranoá é um manancial de extrema importância e objeto de estudo de diversas pesquisas que envolvem desde o monitoramento e a modelagem hidrológicos até a capacidade de autodepuração e qualidade de corpos hídricos. O lago recebe vazões oriundas de quatro principais bacias e da sua área de contribuição direta. A bacia do Riacho Fundo é uma das bacias afluentes ao lago Paranoá, sendo a que mais contribui em termos de vazão (NUNES, G. *et al.*, 2020). Além disso é uma bacia de uso do solo misto, já apresentando, ainda em 2010, cerca de 56% de área urbanizada (MENEZES, 2010), o que leva à impermeabilização do solo e vazões de pico elevadas.

Almeida, A. S. *et al.* (2019) reforçam que a precipitação média na bacia é essencial para sistema de previsão baseados em modelos hidrológicos e avaliaram cinco métodos de estimativa dessa precipitação, entre eles, média aritmética e Thiessen. Tais métodos foram aplicados em duas sub-bacias dos rios Jaguari e Atibaia que apresentam 13 estações de monitoramento pluviométrico. Assim, foi possível

observar que os resultados obtidos para precipitação, a partir da média e de Thiessen, foram similares visto que a disposição dos postos de monitoramento permitiu que as áreas dos polígonos de Thiessen, obtidos a partir da ponderação, fossem similares à média aritmética entre os postos situados em cada sub-bacia.

Tal similaridade entre os métodos também foi observada por Mendonça, Sena e Santos (2015) na determinação da pluviosidade média na sub-bacia do Rio Siriri – SE. Contudo, o método de Thiessen apresentou médias maiores, o que pode ser justificado aos elevados índices pluviométricos observados em áreas de maior influência na bacia. A sub-bacia estudada possui aproximadamente 431km² e para a obtenção da chuva média foram utilizadas seis estações, sendo que duas dessas foram utilizadas somente para a definição dos polígonos de Thiessen.

Lucena *et al.* (2019) utilizaram o método de Thiessen para verificar e comparar com os resultados obtidos para o método aritmético para as bacias do Alto Curso do Rio Paraíba e do Rio Taperoá, que possuem, respectivamente, 5.666,38 km² e 6.717,39 km². A motivação para adoção dessa metodologia se dá pelo fato de que a média aritmética é influenciada por valores extremos, sendo um método mais adequado para precipitações uniformes, situação distinta da observada em regiões semiáridas, que apresentam em geral elevada variabilidade de chuva. Para o método de Thiessen e para a média aritmética foram utilizados, respectivamente, 25 e 20 postos pluviométricos dispostos em duas sub-bacias localizadas na região do Cariri Paraibano. Os resultados obtidos também demonstraram que com os polígonos de Thiessen as médias obtidas são maiores, o que foi justificado pela metodologia do método que é mais robusta que a da média aritmética.

Uma similaridade entre as pesquisas desenvolvidas por Mendonça, Sena e Santos. (2015) e Lucena *et al.* (2019) é a densidade pluviométrica destoante dos valores adequados preconizados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e uma rede de monitoramento não uniforme. A bacia do Riacho Fundo apresenta densidade pluviométrica adequada, situação que é atípica na maioria das bacias do país. É de conhecimento que uma rede pluviométrica mais uniforme poderia conduzir a determinações melhores da precipitação média, pois os métodos de Thiessen e da média aritmética dependem da localização dos postos pluviométricos (ALMEIDA,

A.S. *et al.*, 2019). Assim, questiona-se se uma análise mais minuciosa em uma rede mais robusta utilizando a bacia inteira e, posteriormente, as sub-bacias tenderiam a valores distintos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição espacial e temporal de dois eventos de precipitação distintos na bacia do Riacho Fundo – DF e relacioná-los com as respostas em termos de vazão no exutório. Foram testadas diferentes formas de cálculo da chuva média, utilizando o método de Thiessen para calcular um hietograma médio para toda a bacia e considerando hietograma por sub-bacias, para entrada de dados no modelo hidrológico e verificar se a discretização conduziria a diferenças significativas nos resultados.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo e monitoramento

A bacia do Riacho Fundo é uma bacia de uso do solo misto, possuindo quase metade da área (47,65%) composta por edificações, vias e solo exposto. Possui uma área de aproximadamente 213 km² com relevo predominante de chapada, não ocorrendo terrenos muito acidentados, e pedologia composta predominantemente de solos do tipo latossolo e cambissolo. O clima da bacia é relativo à região do Distrito Federal, caracterizado como clima tropical savana. Esse clima apresenta duas estações bem definidas: a estação seca e a estação chuvosa. Durante a estação chuvosa, que ocorre entre outubro e abril, concentra-se a maior parte da precipitação anual, que possui uma média de 1.500 mm. Nesse período, é comum ocorrer precipitações mensais variando de 200 mm a 300 mm. Por outro lado, durante a estação seca, que abrange os meses de maio a setembro, as chuvas mensais são significativamente menores, com lâminas acumuladas inferiores a 50 mm (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2021).

No monitoramento da bacia foram utilizados 16 pluviógrafos de báscula para obtenção de dados de chuva, sendo 14 operados pelo Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB) e dois por órgãos públicos, disponíveis no Portal Hidroweb, ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2022), e 1 linígrafo de pressão para medição do nível d'água em seção próxima ao exutório. Os pluviógrafos

utilizados sob responsabilidade de operação por parte do PTARH/UnB são da marca Onset, modelo RG3-M. A densidade recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para uma rede de monitoramento pluviométrico em áreas urbanas é de 10 km² a 20 km² por estação (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008). A densidade do monitoramento pluviométrico utilizado no estudo na bacia do Riacho Fundo foi de 16,8 km²/estação e está, portanto, dentro dessa faixa. O monitoramento pluviométrico foi realizado na estação pluviométrica Ponte Aeroporto (60478400) localizada próxima ao exutório da bacia. Para a obtenção da curva-chave da seção foram realizadas medições de vazão com uso do medidor acústico RiverSurveyor M9 da Sontek. A Figura 1 indica a localização da área de estudo, assim como os pontos de monitoramento pluviométrico e fluviométrico.

Os dados pluviométricos foram obtidos no período de outubro de 2019 até fevereiro de 2020, e uma análise de consistência dos dados foi realizada no sentido de identificar problemas e possíveis erros operacionais, isolados ou sistemáticos, e a ocorrência de períodos de falhas e quais as suas possíveis causas. A discretização dos dados adotada nos pluviógrafos operados pelo PTARH/UnB foi de 5 minutos, enquanto os dois pluviógrafos operados por outras instituições coletam dados em intervalos de 10 e 15 minutos. Para uniformizar as séries de dados, os intervalos de tempo maiores foram divididos para corresponder a intervalos de 5 minutos e os valores registrados por esses pluviógrafos foram igualmente divididos entre os intervalos resultantes.

2.2. Seleção dos eventos

A escolha dos eventos deu-se a partir de uma análise preliminar dos hidrogramas e hietogramas do período chuvoso de 2020 e foram selecionados dois eventos que apresentaram vazões de pico similares e dados de precipitação completos para os mesmos pluviógrafos. Dessa forma, foram escolhidos os eventos do dia 18 e do dia 23, ambos em dezembro de 2019, e com dados de 14 pluviógrafos disponíveis, pois 2 pluviógrafos apresentaram problemas.

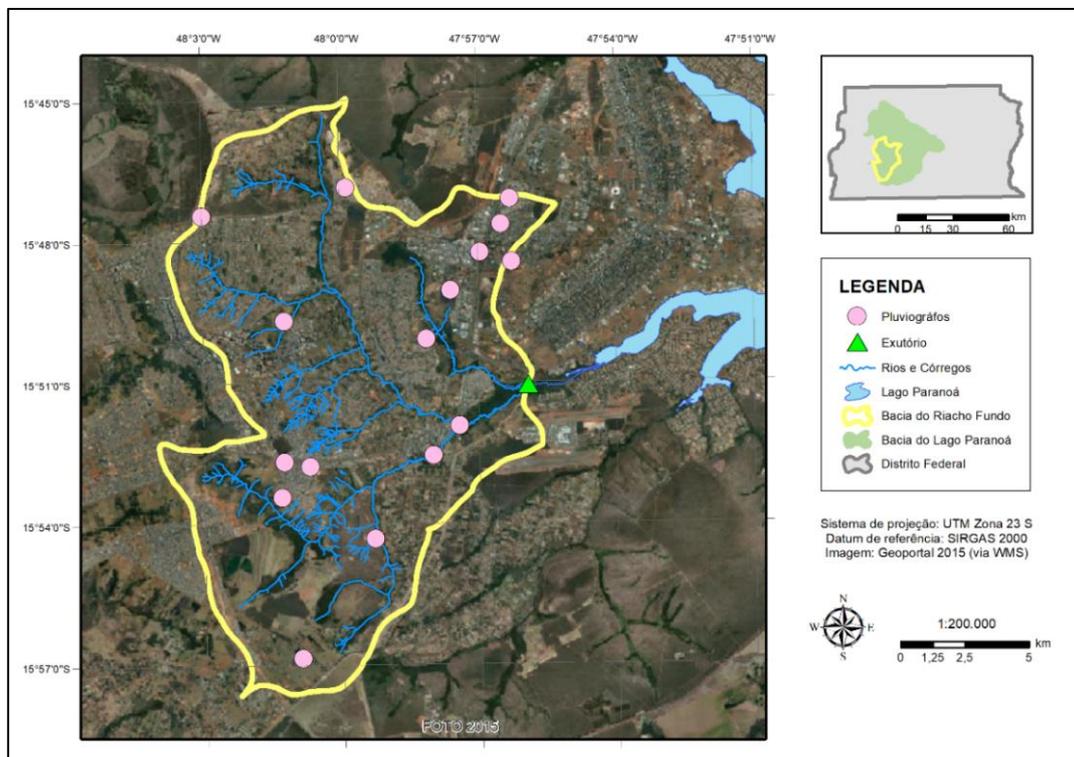
Foram calculados os hietogramas médios para cada evento selecionando as 3 horas de evento mais representativas em termos de vazão. Os cálculos foram realizados com intervalos de 5 minutos, que correspondem à discretização das

séries de precipitação, porém esse período de 3 horas também foi dividido em 6 intervalos de 30 minutos para que fosse possível obter uma visualização mais abrangente da distribuição

espacial e temporal do evento chuvoso.

Salienta-se que os dados de precipitação foram discretizados em intervalos de 5 e 30 minutos para facilitar a análise dos eventos.

Figura 1 - Localização da bacia do Riacho Fundo (DF), dos pluviômetros e da seção do exutório



Fonte: Silva, Carvalho e Koide (2021).

2.3. Interpolação espacial e cálculo de precipitação média

A interpolação espacial dos dados de chuva foi realizada pelo método da krigagem que permitiu a elaboração de mapas que representam a distribuição espacial em cada intervalo de tempo analisado, sendo traçadas também as isoietas. Para a realização da krigagem foi utilizado o *software* de geoprocessamento ArcGIS, aplicando-se a ferramenta de Kriging, inserida no conjunto de ferramentas *Spatial Analyst Tools*, e escolhido o modelo ordinário e semivariograma esférico. Como dados de entrada foram utilizadas as intensidades de precipitação dos seis intervalos mais representativos de cada pluviômetro. Para a elaboração das isoietas foi utilizada a ferramenta *Contour with Barriers* (contorno com barreiras) do mesmo *software*. As isoietas permitiram a confecção de mapas que representam o comportamento espacial da chuva, a cada 30 minutos, funcionando como uma espécie de fotografia da chuva para cada momento.

Para a obtenção da chuva média foi utilizado o método de Thiessen. Primeiramente, foi realizada, com o auxílio do *software* de geoprocessamento ArcGIS, a elaboração dos polígonos de Thiessen, que indicaram a porcentagem de influência de cada pluviômetro na bacia. Para uma análise mais discretizada espacialmente, também foram determinadas as porcentagens de influência dos polígonos de Thiessen dentro de cada uma das 22 sub-bacias presentes na bacia do Riacho Fundo. Utilizando as porcentagens encontradas, foi realizado com o *software* Excel o cálculo da chuva média para os dois eventos, nos intervalos de 30 minutos, utilizando as ponderações para a bacia inteira e para as sub-bacias. Os cálculos resultaram em hietogramas da chuva média para a bacia toda e para as sub-bacias.

Adicionalmente, calculou-se a média de chuva em intervalos de 30 minutos para a área da bacia toda pela média aritmética a fim de comparar com os resultados da média calculada pelo método de Thiessen.

2.4. Modelagem no SWMM

A base do modelo utilizada foi construída no trabalho de Carvalho (2022) e já contava com a divisão de sub-bacias e dados de suas características físicas, como área e declividade, além de rede de macrodrenagem, com elevações, comprimentos, rugosidade e geometria das seções transversais dos canais. Nas opções de simulação, foi adotado o método de infiltração da Curva Número (CN), sendo que o parâmetro CN também já havia sido determinado para as sub-bacias, e o modelo de onda dinâmica para propagação do escoamento na rede de drenagem, que representa os cursos d'água.

As chuvas médias obtidas a partir do método de Thiessen serviram de dados de entrada para a modelagem no modelo *Storm Water Management Model (SWMM)*, através do *software* PCSWMM. Foram simuladas duas situações para cada dia de evento: chuva inserida como média calculada para a área da bacia inteira, sendo considerada uniforme em toda a área; e chuvas inseridas para cada sub-bacia como média calculada para a área daquela sub-bacia. É importante ressaltar que o modelo não estava calibrado, nem foi parte do escopo deste trabalho a sua calibração; assim foram adotadas as características físicas e parâmetros determinados anteriormente para essa bacia.

2.5. Elaboração de hidrogramas e separação do escoamento de base

Os hidrogramas foram elaborados a partir dos dados de vazão relativos a cada evento, discretizados de 10 em 10 minutos de acordo com configuração do equipamento de monitoramento contínuo do nível d'água. No entanto, para comparação com os resultados das simulações, se fez necessária a separação do escoamento de base para considerar apenas a parcela do escoamento superficial, que foi a variável simulada. Para tanto, aplicou-se o filtro matemático descrito por Arnold e Allen (1999) à série de vazão de cada evento com o parâmetro beta determinado por tentativa e erro para encontrar, visualmente, a melhor separação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dois eventos chuvosos escolhidos apresentam características distintas. A chuva do dia 18/12/2019 teve uma duração aproximada de 5 horas, levando à vazão de pico de 15,2 m³/s, com

cerca de 2 horas de defasagem em relação ao início da precipitação. Já o evento do dia 23/12/2019 apresentou uma duração de 3 horas com vazão de pico de 18,3 m³/s e defasagem de 3,5 horas. As chuvas do dia 18 e do dia 23 apresentaram, respectivamente, intensidade média de precipitação de 1,24 mm/h e 2,83 mm/h e intensidade máxima de precipitação 6 mm/h e 6,6 mm/h, para duração de 30 minutos. O intervalo escolhido para a chuva do dia 18 iniciou às 15h10 e terminou às 17h40 e, para o evento do dia 23, iniciou às 16h20 e terminou às 18h50. Salienta-se que nos dias escolhidos pode ter ocorrido outras chuvas nas bacias, entretanto no presente estudo procurou-se obter o intervalo mais adequado aos objetivos propostos no trabalho.

A partir dos dados levantados é possível afirmar que as chuvas selecionadas apresentaram precipitação média e máxima similares, bem como resultaram e vazões de pico semelhantes. Contudo, as defasagens entre o início da chuva e o pico de vazão foram diferentes. A partir das Figuras 2 e Figura 3, nota-se que os hietogramas, mesmo possuindo intensidades de precipitação sendo similares, apresentam distribuição temporal da chuva distinta entre os eventos. Os hidrogramas, também das Figuras 2 e Figura 3 demonstram que as chuvas tiveram comportamentos parecidos no exutório, entretanto a chuva do dia 23 permaneceu mais tempo com uma vazão próxima à vazão de pico.

A compreensão da distribuição espacial da chuva ocorreu a partir da elaboração das isoietas de ambos os eventos. A evolução dos eventos foi apresentada em 6 recortes de mesma duração. O evento do dia 18 começou na porção nordeste da bacia do Riacho Fundo, deslocou-se para o centro formando dois focos de precipitação e durante a última 1,5 hora manteve-se na porção leste. A chuva do dia 23 foi bem distinta da analisada anteriormente. Ela teve início na porção oeste da bacia, deslocando-se para sul e leste em dois focos de chuva distintos. Posteriormente, a partir do terceiro recorte, a chuva apresentou maior incidência na porção norte da bacia e foi se dissipando até o fim do evento chuvoso.

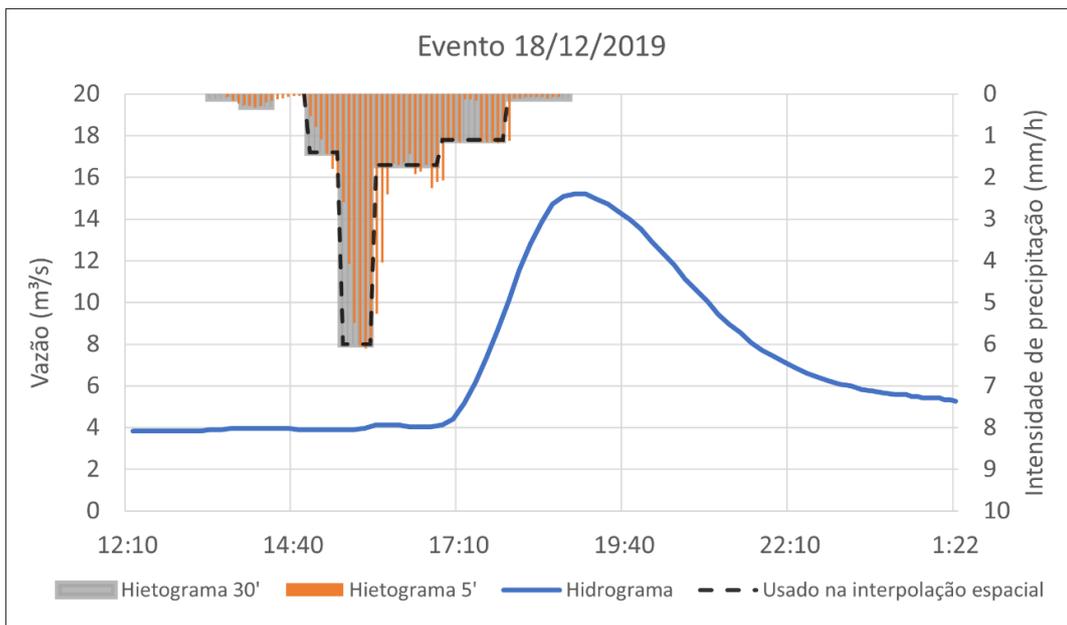
As Tabelas 1 e 2 apresentam as lâminas precipitadas observadas nos eventos dos dias 18/12/2019 e 23/12/2019, respectivamente. Essas tabelas foram analisadas em conjunto com os resultados da distribuição espacial obtidos por meio de *software* de geoprocessamento.

A krigagem ordinária apresentou resultados coerentes da variabilidade espacial da chuva, com

exceção do primeiro intervalo de cada evento. Os primeiros intervalos de cada evento (15h10 às 15h40 para a chuva do dia 18 e 16h20 às 16h50 para a chuva do dia 23) apresentaram resultados insatisfatórios não representando a variabilidade espacial da chuva e não permitindo uma análise visual da chuva como nas demais imagens, pois apresentaram uma chuva uniforme e distribuída por toda a bacia. Esse resultado não corresponde à realidade observada em campo. Em ambos os

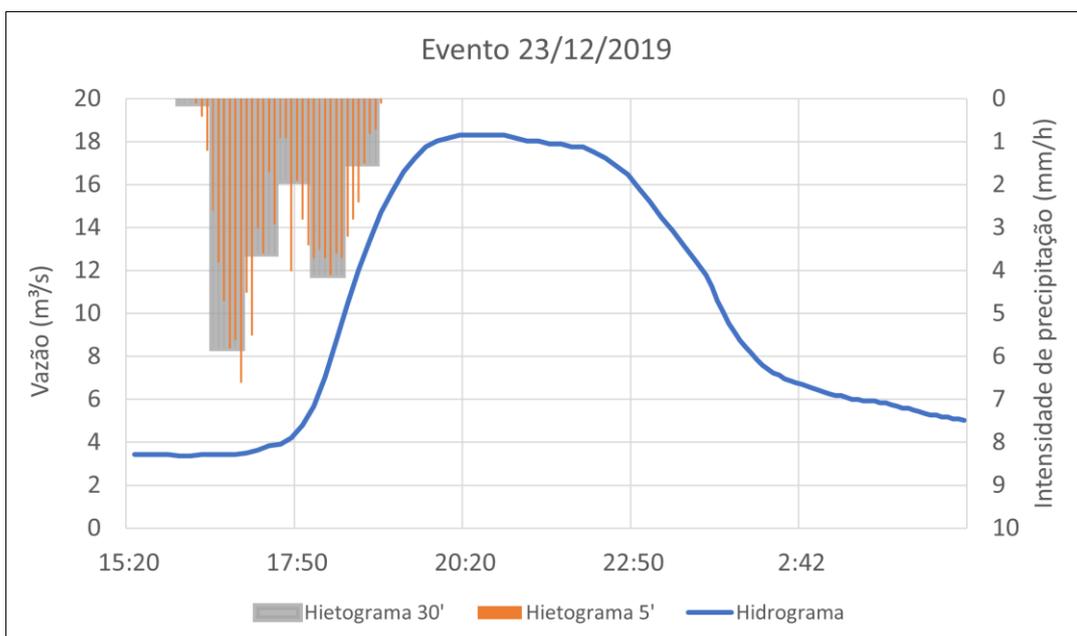
casos, nesses primeiros recortes foi registrada, em uma área muito concentrada ou somente em um dos pluviógrafos, uma precipitação pontual, isolada e de maior representatividade que nos demais pluviógrafos, que apresentaram precipitações baixíssimas ou nulas. A ausência de um bom resultado para esse primeiro intervalo pode ser um indicativo para a limitação do método. Tais considerações podem ser observadas nas Figura 4 e Figura 5.

Figura 2 - Hietogramas médios e hidrograma para o evento do dia 18/12/2019



Fonte: Silva, Carvalho e Koide (2021).

Figura 3 - Hietogramas médios e hidrograma para o evento do dia 18/12/2019



Fonte: Silva, Carvalho e Koide (2021).

Tabela 1 - Lâminas precipitadas discretizadas em 30'/30' observadas para o evento 18/12/2019

Estação Pluviométrica	Lâmina Precipitada (mm)					
	Horário					
	15:10	15:40	16:10	16:40	17:10	17:40
ETE RF II	6,4	4,4	0	0,4	0	0
Escola RF I	10	8	0	0	0	0
CBM RF I	0,4	2,4	0	0,4	0	0
Escola RF II - CAUB	0	0	0,4	2,4	0	0,4
Centro Psicicultura - Granja Ipê	0	0	2	1,6	1,6	1,2
Parque Guará	1,2	0	2,4	0	0	0
Cruzeiro Novo	0	32	1,2	0	0	0
Octogonal	0	15,6	1,2	0	0	0
SIA	0	15,6	2,8	0	0	0
Bacia Guará	0,4	0,4	2,4	0	0	0
Vicente Pires - Caesb	0	0	2,8	0	0	0
Montante Zoo - ANA	0	0	0	17,2	12,8	13,2
Vila Cauhy- Cemaden	0	0	6,4	0	0,4	0
Escola Estrutural	0	0	0	0	0	0

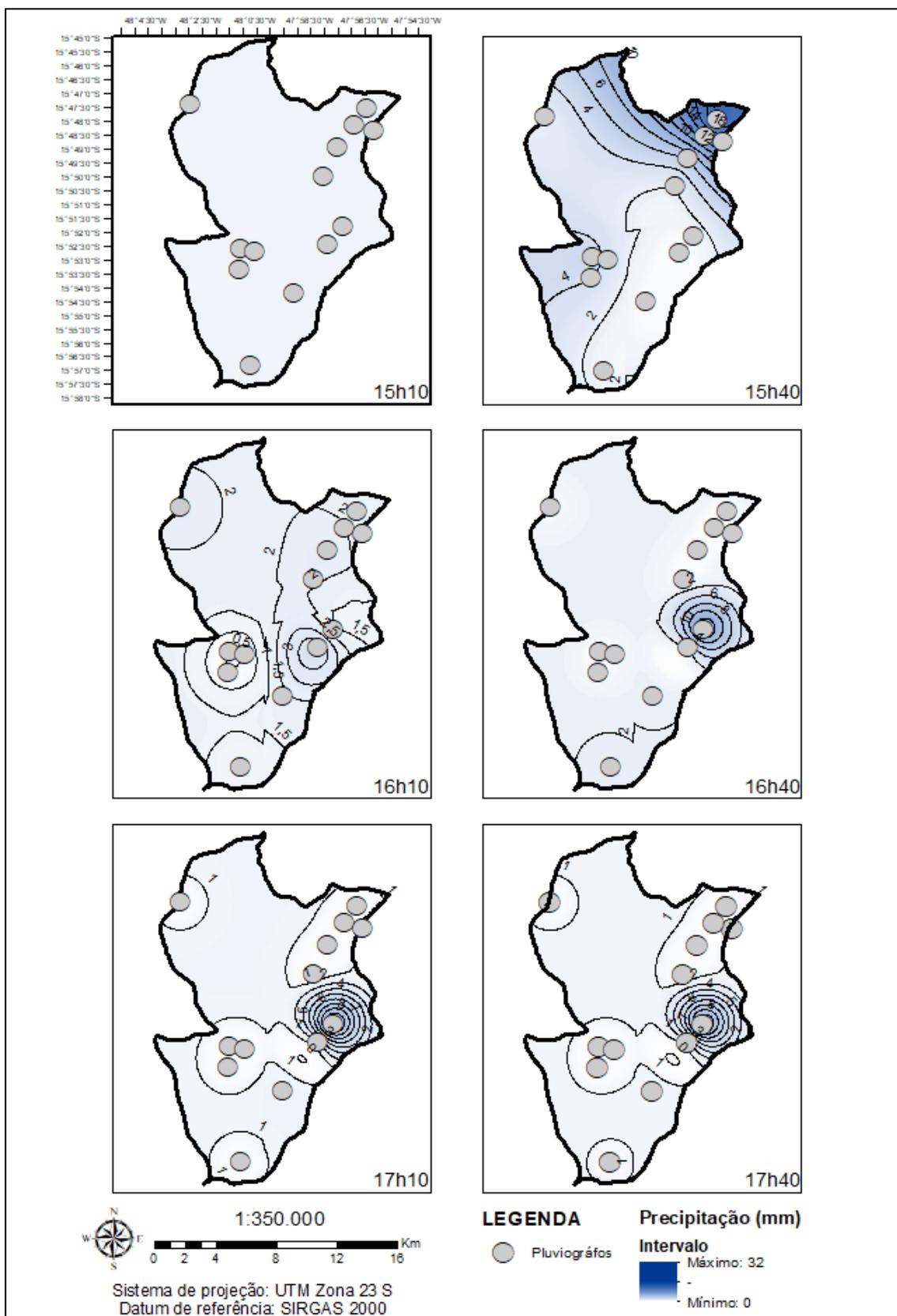
Fonte: Autores (2022).

Tabela 2 - Lâminas precipitadas discretizadas em 30'/30' observadas para o evento 23/12/2019

Estação Pluviométrica	Lâmina Precipitada (mm)					
	Horário					
	16:20	16:50	17:20	17:50	18:20	18:50
ETE RF II	0	18	0	0	0,4	4
Escola RF I	0,8	25,6	0,4	0	2,8	5,2
CBM RF I	0	13,2	0	0	0,8	1,2
Escola RF II - CAUB	0	0	17,2	0	0	0
Centro Psicicultura - Granja Ipê	0	5,6	4,4	0,4	0	2,4
Parque Guará	0	5,6	5,6	0	4,8	1,6
Cruzeiro Novo	0	0	0	0	6,8	1,2
Octogonal	0	0	0	0	2,8	1,2
SIA	0	0	0	0	5,2	1,6
Bacia Guará	0	2,8	1,2	0,8	4,8	1,6
Vicente Pires - Caesb	0	0	2	10,4	12,8	0
Montante Zoo - ANA	0	0	0	0	0	0
Vila Cauhy - Cemaden	0	4,4	19,6	0	2,4	1,2
Escola Estrutural	0	5,6	0	14,8	13,6	0

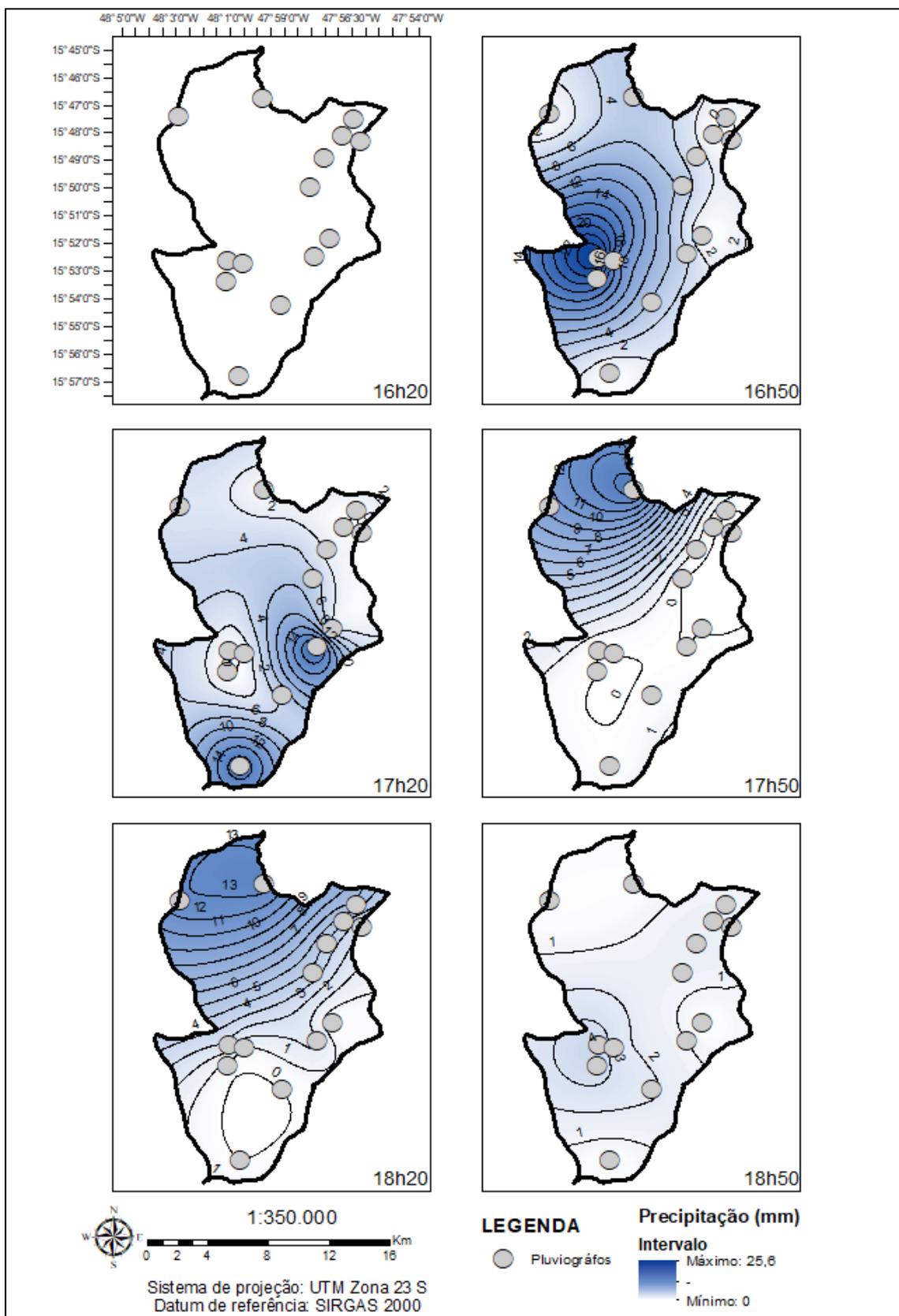
Fonte: Autores (2022).

Figura 4 - Resultados da interpolação espacial por krigagem e isoietas para o evento do dia 18/12/2019



Fonte: Silva, Carvalho e Koide (2021).

Figura 5 - Resultados da interpolação espacial por krigagem e isoietas para o evento do dia 23/12/2019



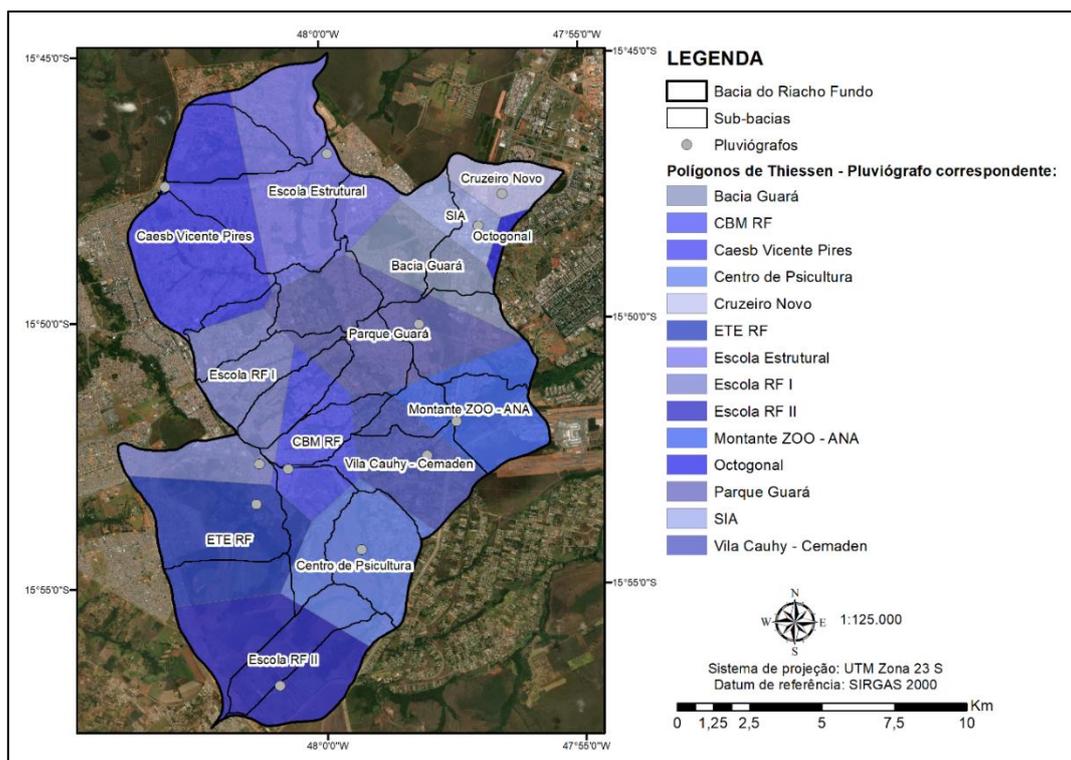
Fonte: Silva, Carvalho e Koide (2021).

A análise das isoietas em conjunto com os hidrogramas e hietogramas (Figura 2 e Figura 3), também permite a elaboração de uma justificativa para a diferença de tempo de resposta para a vazão no exutório. No dia 18, a vazão começa a subir após cerca de 2 horas do início do evento chuvoso analisado, e já no dia 23, a vazão começa a subir em menos de 1,5 hora após o início da precipitação. Um dos possíveis motivos para a resposta mais lenta no evento do dia 18 é que, mesmo que a área na qual a precipitação se concentrou seja mais próxima do exutório, ela é atendida por uma rede de drenagem urbana, que lança as águas pluviais numa bacia de retenção antes do lançamento no córrego que deságua no riacho Fundo, assim atenuando e atrasando a vazão de pico.

Outro ponto a ser observado é que a chuva que ocorreu no evento do dia 23 é mais distribuída e intensa, o que justifica a manutenção da vazão próxima à vazão de pico por um período maior. A variabilidade da distribuição de chuva na bacia também pode justificar o prolongamento da onda de cheia devido às distâncias que deveriam ser percorridas, desde o ponto de chuva até o ponto de análise no exutório.

A partir dos resultados obtidos para chuva média pelo método de Thiessen, também foi possível avaliar a diferença existente entre esse método e o método da média aritmética independentemente do evento analisado. A Figura 6 apresenta o resultado obtido a partir do *software* de geoprocessamento ArcGIS para a delimitação de polígonos de Thiessen adotada.

Figura 6 - Polígonos de Thiessen considerando a rede pluviométrica disponível



Fonte: Autores (2022).

A média aritmética é um método indicado quando há estações uniformemente distribuídas em uma bacia de relevo plano ou muito suave. A condição de terreno é atendida pela bacia do Riacho Fundo, e a densidade pluviográfica manteve-se dentro da recomendação da OMM, mas a partir da análise da localização dos pluviômetros em mapa nota-se que a distribuição desses não é homogênea. Salienta-se que a

distribuição e cobertura de estações pluviográficas na bacia do Riacho Fundo é consideravelmente robusta, no entanto cerca de 43% dos pluviômetros encontram-se localizados na porção nordeste da bacia. As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de chuva média para cada intervalo e cada evento calculados pelos métodos de Thiessen e da média aritmética.

A modelagem foi realizada para os dois

eventos utilizando os dados de chuva média obtidos a partir de Thiessen em dois cenários, um para a bacia inteira e outro para as sub-bacias, resultando em 4 simulações. Somente a simulação para o dia 18/12/2019 com a divisão da área em sub-bacias e cálculo da chuva média para cada uma delas gerou escoamento superficial no exutório decorrente da chuva. A única sub-bacia que gerou escoamento foi a sub-bacia com um dos valores do parâmetro *Curve Number* (CN) mais

elevados e a que apresentou maior intensidade de chuva em um dos intervalos de 30 min. Esse resultado apresentou uma defasagem de cerca de 1,5 hora, a qual pode em parte ser explicada pela existência de um reservatório de detenção a jusante da área em que ocorreu a precipitação e que não foi considerado na modelagem. Dessa forma, a vazão de pico simulada pelo modelo ocorreu antes do que o pico observado em campo, como mostrado na Figura 7.

Tabela 3 - Comparativo da espacialização de dados pontuais de precipitação do evento 18/12/2019

Horário	Precipitação média da Área Total (mm)					
	15:10	15:40	16:10	16:40	17:10	17:40
Thiessen - Bacia Inteira	1,64	2,52	1,43	1,58	1,02	1,02
Média Aritmética	1,30	5,60	1,50	1,60	1,10	1,10

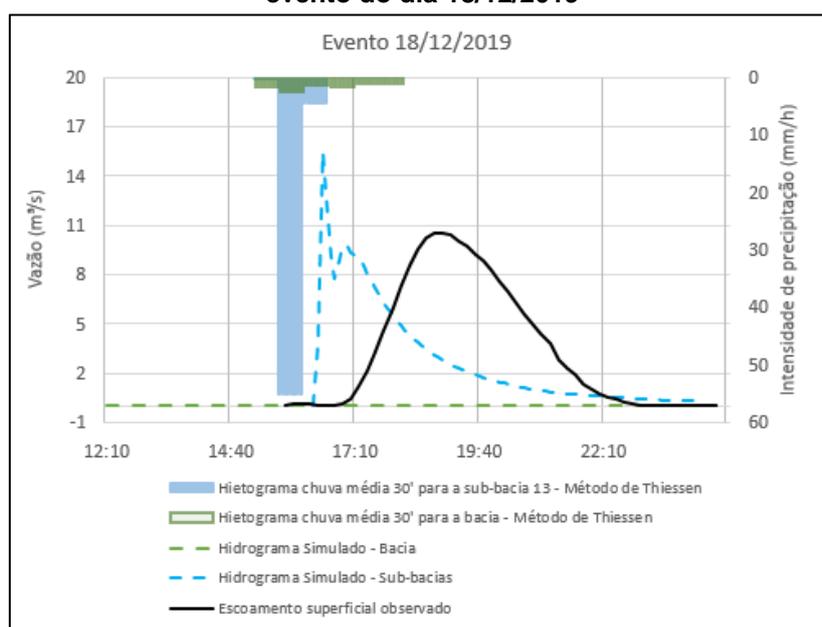
Fonte: Autores (2022).

Tabela 4 - Comparativo da espacialização de dados pontuais de precipitação do evento 23/12/2019

Horário	Precipitação média da Área Total (mm)					
	16:20	16:50	17:20	17:50	18:20	18:50
Thiessen - Bacia Inteira	0,07	6,78	4,16	3,09	4,73	1,50
Média Aritmética	0,06	5,77	3,60	1,89	4,09	1,51

Fonte: Autores (2022).

Figura 7 - Hietogramas de entrada e hidrogramas simulados para o evento do dia 18/12/2019



Fonte: Autores (2022).

Nas outras 3 simulações, uma para o dia 18/12/2019 e outras duas para o dia 23/12/2019, não foi observado escoamento superficial resultante. O cálculo da infiltração no SWMM é realizado por uma adaptação do método *Soil Conservation Service* (SCS), que utiliza o parâmetro CN e considera uma abstração inicial da chuva que não se converte em escoamento. Apesar de uma grande porção da bacia ser urbanizada, os parâmetros CN adotados levaram a uma abstração inicial capaz de absorver toda a lâmina precipitada, que foi então infiltrada. O escoamento gerado na simulação para o dia 18/12/2019 está associado a uma sub-bacia de CN elevado, mas também a uma chuva muito intensa nessa sub-bacia, como mostra a Figura 8. Assim, a pequena magnitude dos valores médios dos eventos de chuva estudados juntamente ao método de infiltração e parâmetros adotados, resultaram em uma total infiltração da chuva e não geração de escoamento em 3 das 4 simulações, indicando a necessidade de calibração do modelo para que ele se aproxime da vazão observada no exutório.

4. CONCLUSÕES

O método da krigagem mostrou-se adequado para a espacialização da chuva, somente apresentando falhas quando os dados de chuva eram muito espaçados e/ou as precipitações eram baixas e pontuais. A partir da análise das isoietas dos eventos, observou-se que as duas chuvas apresentaram características bem diferentes quanto à distribuição espacial e temporal. No entanto, as respostas observadas nos hidrogramas não apresentaram comportamento tão distinto, mostrando que o conhecimento e análise do hidrograma no exutório associado a um evento de precipitação não é suficiente para compreender o comportamento da chuva na área da bacia e evidenciando a importância do monitoramento extensivo da chuva em pontos distribuídos na área de estudo.

A utilização do método dos polígonos de Thiessen permite obter a chuva média de maneira mais simples, pois os fatores de ponderação são constantes, mas o estudo mostra que com eventos de características diferentes a ponderação pode levar a uma maior imprecisão na avaliação da

distribuição espacial, principalmente quando comparado ao método das isoietas.

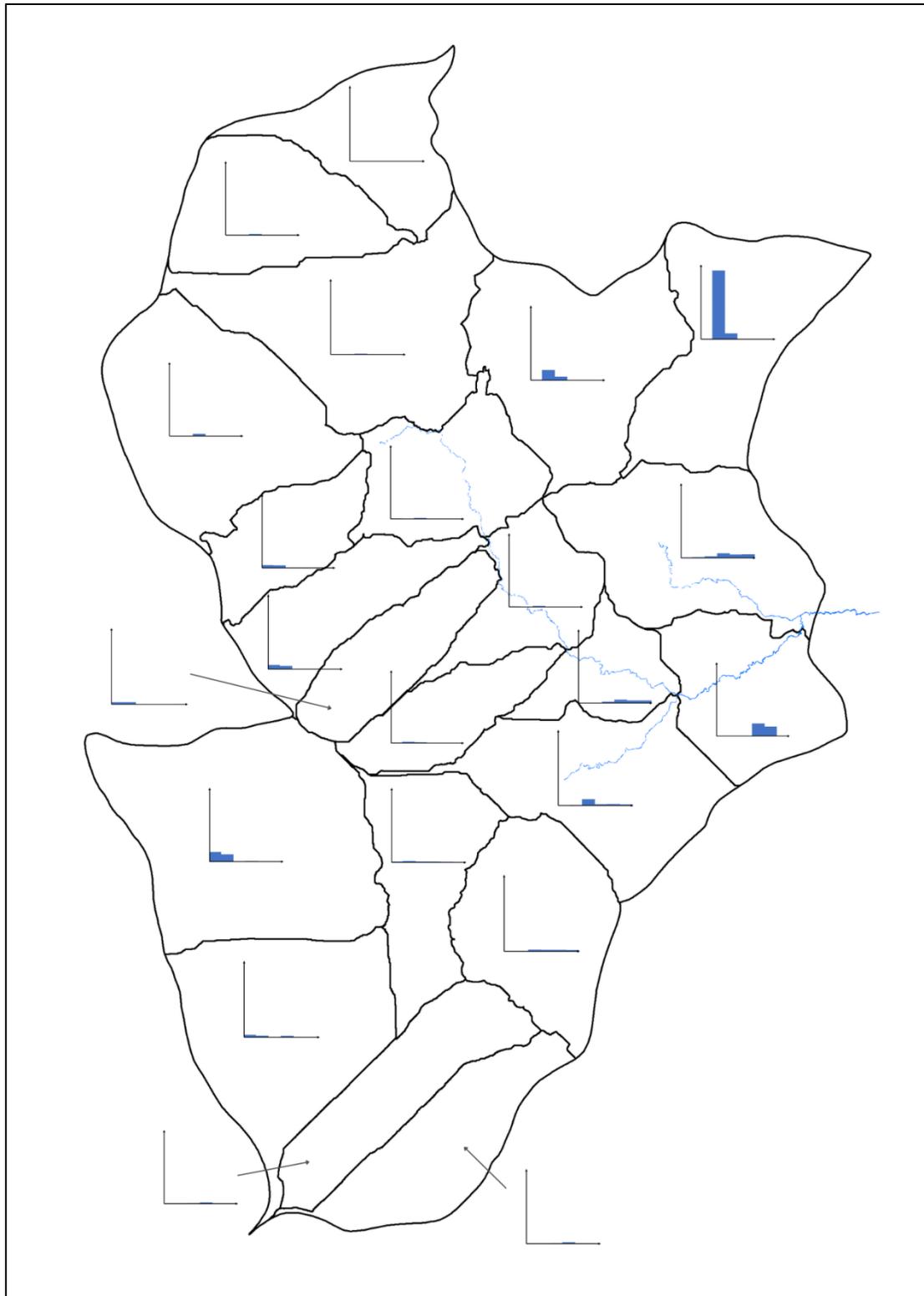
As simulações realizadas no modelo SWMM não apresentaram resultados compatíveis com os valores de vazão observados, com exceção da simulação realizada utilizando-se precipitações discretizadas por sub-bacia, mostrando, assim, a importância de se considerar a distribuição espacial das precipitações para se obter uma adequada simulação de eventos, em especial em áreas urbanas.

Parte das diferenças entre os resultados da modelagem e os dados observados em campo poderiam ser reduzidas pela calibração do modelo, mas se a distribuição espacial da chuva não for considerada, a calibração pode levar a valores de parâmetros que não representam o real comportamento da bacia.

Dessa maneira, conclui-se que para a compreensão dos efeitos de uma chuva na geração de cheias em uma bacia é imprescindível a existência de um monitoramento da precipitação distribuído em toda a área, com uma rede de pluviógrafos. Somente a observação das vazões no exutório e considerando precipitações uniformes sobre a bacia, mesmo sendo essa relativamente pequena, não foi suficiente para representar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica estudada. Além disso, recomenda-se para futuros trabalhos na área de estudo a realização da etapa de calibração, visando tornar as respostas do modelo mais confiáveis e aprofundar a avaliação entre os cenários com diferentes entradas de chuva.

No Distrito Federal, a necessidade de um monitoramento mais representativo das precipitações em áreas urbanas foi assimilada pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa) na construção do Sistema de Monitoramento de Chuvas Urbanas (SIMCURB), que conta com uma rede de monitoramento pluviométrico com 42 pluviógrafos instalados pela Agência e com 20 pluviógrafos de órgãos parceiros, operados pela Caesb, IBRAM e UnB. A robustez no monitoramento permite que as causas de alagamentos possam ser melhor avaliadas e indicar soluções tecnicamente mais embasadas que possam ser implementadas para o manejo das águas pluviais nas áreas urbanas.

Figura 8 - Hietogramas médios calculados por Thiessen para cada sub-bacia para o evento do dia 18/12/2019



Fonte: Autores (2022).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de pesquisa de iniciação científica; À UnB, CAPES, ANA, FAPDF, FINEP, FINATEC e FUNAPE pelo apoio ao projeto de pesquisa a que este trabalho está associado; à Adasa e Caesb pelo apoio na coleta de dados em campo; e à CHI Water pela licença acadêmica do *software* PCSWMM.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. S.; SORRIBAS, M. V.; GONÇALVES, J. E.; LEITE, E. A. Estimativas da precipitação média na bacia e a calibração de modelos hidrológicos para fins de previsão operacional. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, 2019, Foz do Iguaçu, PR. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/361798561_ESTIMATIVAS_DA_PRECIPITACAO_MEDIA_NA_BACIA_E_A_CALIBRACAO_DE_MODELOS_HIDROLOGICOS_PARA_FINS_DE_PREVISAO_OPERACIONAL. Acesso em: 08 jan. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**, 2022. Portal Hidroweb. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 04 jan. 2022.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. **Journal of the American Water Resources Association**, 35(2), p. 411-424, 1999.
- CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 47(9), p.1235-1242, set. 2012.
- CARVALHO, D. J. **Cargas de poluição difusa na bacia do Riacho Fundo – Brasília/DF**. 2022. 178 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022.
- CUNHA, A. M. *et al.* Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 48(9), p. 1179-1171, set. 2013.
- FAURÈS, J. *et al.* Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. **Journal of Hydrology**, v. 173, p. 309-326, dec. 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216949502704S>. Acesso em: 04 jan. 2022.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **INMET divulga Previsão Climática para os próximos 4 meses no Distrito Federal**. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/inmet-divulga-previs%C3%A3o-clim%C3%A1tica-para-os-pr%C3%B3ximos-4-meses-no-distrito-federal#:~:text=A%20previs%C3%A3o%20do%20modelo%20clim%C3%A1tico,entre%2025%20e%20300%20mm>. Acesso em: 08 jan. 2022.
- LUCENA, D. B.; OLIVEIRA, J. V. P.; ANDRADE, A. R.; LIMA, P. R. C. (2019). (no texto está como Lucena *et al.*, então sugerimos alterar nas referências e manter apenas LUCENA, D. B. *et al.*) Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação nas sub-bacias do rio Taperoá e do Alto Curso do Rio Paraíba. **Revista de Geografia**, Recife, 36 (3), p. 179-198, 2019.
- MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, 13 (1), jan./fev. 2018. Disponível em: http://www.ambi-agua.net/seer/files/Ambi_Agua_V13_N1.pdf. Acesso em: 06 jul. 2021.
- MAZZOLENI, M.; BRANDIMARTE, L.; AMARANTO, A. Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling. **Journal of Hydrology**. v. 578, p. 1-16, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216941930811X>. Acesso em: 21 dez. 2021.
- MEDEIROS, V. M. A. de; MOREIRA, L. F. F.; RIGHETTO, A. M. Análise do Efeito da Variabilidade Espacial da Precipitação na Modelagem do Escoamento numa Bacia Experimental no Semi-árido Nordeste. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12(3), p. 129-139, 2007. Disponível em:

<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=18&SUMARIO=238> Acesso em: 29 set. 2020.

MENDONÇA, M. C. S.; SENA, I. M. N.; SANTOS, M. R. A. Comparação dos métodos da média aritmética e de Thiessen para determinação da pluviosidade média da sub-bacia do rio Siriri. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL RESAG, 2, 2015, Aracaju. Anais [...]*, Aracaju: UNIT, p. 1-6.

MENEZES, P. H. J. **Avaliação do efeito das ações antrópicas no Processo de escoamento superficial e Assoreamento na bacia do lago Paranoá**. 2010. 117 p. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicada) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2010.

NUNES, G.; MINOTI, T. RICARDO; KOIDE, S. Mathematical Modeling of Watersheds as a Subsidy for Reservoir Water Balance Determination: The Case of Paranoá Lake, Federal District, Brazil". *Hydrology*, 7(4), 85, nov. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/7/4/85>. Acesso em: 07 jul. 2021.

SILVA; G. L.; CARVALHO, D. J.; KOIDE, S. Análise da Distribuição Espacial de Eventos de Precipitação e dos Seus Hidrogramas Correspondentes na Bacia do Riacho Fundo – DF. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS*

HÍDRICOS, 24, Belo Horizonte, ABRHidro, 2021. Disponível em:

https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/152/1c593ae8cecec60c452c23e6957ee8d0_c7686f3ef9d2deaaa5dec97ba3ee6c14.pdf. Acesso em: 08 jan 2021.

STRAUCH, M. *et al.* (2012). Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, v. 414-415, p. 413-424, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/20965673/Using_precipitation_data_ensemble_for_uncertainty_analysis_in_SWAT_streamflow_simulation. Acesso em: 07 jul. 2021.

VIOLA, M. R. *et al.* Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(9), p. 970-978, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/MXGTqmPFvgFVt8VwrXpndqw/>. Acesso em: 07 jul. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Methods of observation. *In: Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information*. 6. ed. Geneva, Switzerland, v. 1, cap. 2, p. 24-27, (WMO - n. 168), 2008. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10473. Acesso em: 20 dez. 2021.