

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO E DOS SEUS HIDROGRAMAS CORRESPONDENTES NA BACIA DO RIACHO FUNDO – DF

Gabriela Larissa Silva¹ ; Daniela Junqueira Carvalho² & Sergio Koide³

RESUMO

As precipitações intensas em geral apresentam grandes variabilidades temporal e espacial, que influenciam fortemente nos hidrogramas de escoamento superficial resultantes, principalmente em pequenas bacias. O monitoramento dessa variável é feito por estações pluviométricas, que geram dados de precipitação pontuais, e para entender a distribuição espacial é necessária a aplicação de métodos de interpolação, como a krigagem. Neste trabalho, realizou-se a interpolação espacial dos dados de precipitação de dois eventos ocorridos em dezembro de 2019 na bacia do Riacho Fundo (DF) pelo método da krigagem ordinária e elaboração de mapas com os resultados. Foram analisadas as distribuições espaciais ao longo dos eventos e os hidrogramas no exutório da bacia correspondentes a eles. Para tanto, foram usados dados obtidos pelo monitoramento pluviométrico e fluviométrico na bacia, no ano hidrológico de 2019 a 2020, por meio de pluviógrafos de balsa e linígrafo de pressão respectivamente. A espacialização dos dados de precipitação possibilitou a observação da evolução do temporal do comportamento espacial da chuva nos eventos estudados, que apresentaram características bem diferentes. Apesar disso, as vazões no exutório apresentaram valores de pico próximos e os hidrogramas formatos similares para ambos os eventos. O conhecimento da distribuição espacial da chuva durante os eventos permitiu fazer considerações sobre os hidrogramas, porém a análise dos hidrogramas em si não foi suficiente para interpretar a variação espacial da chuva que ocorreu na área da bacia nos eventos, mostrando que, além do monitoramento de vazão, é necessário o monitoramento da chuva em pontos distribuídos por toda a bacia para o completo entendimento de um evento chuvoso e seu impacto no escoamento superficial.

Palavras-Chave – chuva, krigagem ordinária, interpolação espacial.

INTRODUÇÃO

Compreender o ciclo hidrológico da água é de extrema importância para o manejo de águas pluviais e para permitir que ocorra uma gestão dos recursos hídricos eficiente. A precipitação é a principal parcela do ciclo hidrológico, representando a entrada de água na bacia hidrográfica, e possui como característica a variação no tempo e no espaço. Para o monitoramento dessa variável, são usados pluviômetros, que registram a lâmina precipitada em um período de tempo específico, ou pluviógrafos, que coletam dados de chuva de forma contínua no tempo (Porto *et al.*, 2009). Por serem obtidas medidas pontuais, nem sempre os resultados obtidos representam a realidade espacial e o comportamento da chuva.

Devido ao fato de os dados de precipitação serem obtidos em estações pontuais e, geralmente, afastadas, há a necessidade de se utilizar métodos de interpolação espacial para converter esses dados

1) Estudante de Engenharia Ambiental – ENC/UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF. gabrielalarissa.silva@gmail.com.

2) Mestranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – PTARH/ENC/UnB. d.junqueirac@gmail.com.

3) Professor Associado do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – PTARH/ENC/UnB. skoide@unb.br.

em um campo contínuo para realizar o seu mapeamento (Carvalho *et al.*, 2012). Dessa forma, a interpolação surge como uma alternativa para a compreensão da distribuição espacial de uma precipitação, sendo destaque dentre os métodos utilizados o método da krigagem.

A krigagem ordinária é um método geoestatístico univariado de interpolação e tem sido aplicada eficientemente em diversos estudos de interpolação de dados pluviométricos (Cunha *et al.*, 2013). Esse método utiliza a proximidade como um parâmetro para a estimativa de valores e incorpora pesos diferentes para cada amostra, dessa forma apresenta grande correlação espacial. Por utilizar a dependência espacial de amostras vizinhas para a estimativa dos demais valores, o método não apresenta tendência e tem variância mínima (Carvalho e Assad, 2005). Para esse método de interpolação há três modelos de semivariograma principais: exponencial, esférico e gaussiano.

O monitoramento da precipitação é de extrema importância para estudos de modelagem hidrológica com diferentes enfoques, desde disponibilidade hídrica à poluição dos corpos d'água receptores de efluentes, tendo em vista que essa é uma variável de entrada nos modelos. Os métodos de interpolação auxiliam na estimativa das precipitações médias, levando em consideração a necessidade de discretização espacial das bacias hidrográficas para a representação das mesmas (Viola *et al.*, 2010). Assim, uma rede de monitoramento pluviométrico robusta e bem distribuída espacialmente é imprescindível para a obtenção de séries de dados confiáveis (Carvalho *et al.*, 2017) e para melhores estimativas de precipitação média. O monitoramento de vazões no exutório da área de contribuição também é fundamental para compreender o comportamento hidrológico de uma bacia, porém deve ser aliado ao adequado monitoramento pluviométrico para se ter um conjunto de informações mais completo sobre os processos ocorridos na área.

No Distrito Federal (DF), o lago Paranoá consiste em um manancial de grande importância, sendo objeto de diversos trabalhos que envolvem o monitoramento e a modelagem hidrológicos. A bacia do Riacho é a que mais contribui em termos de vazão para o lago Paranoá (Nunes, 2016). Além disso, ela é a bacia mais urbanizada que contribui para o lago, tendo, ainda em 2009, 56,2% da área considerada urbanizada, o que favorece vazões de pico elevadas (Menezes, 2010).

O presente trabalho teve como objetivo analisar a distribuição espacial de dois eventos de precipitação na bacia do Riacho Fundo, no DF, ao longo do tempo, realizando a interpolação dos dados de monitoramento pluviométrico pelo método da krigagem. Além disso, analisou-se a resposta da vazão correspondente a esses eventos no exutório da bacia com a elaboração de hidrogramas a partir dos dados de monitoramento pluviométrico.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia do Riacho Fundo possui uma área de aproximadamente 218 km² e alto grau de urbanização, contando com quase metade da área (47,65%) composta por edificações, vias e solo exposto, sendo o restante correspondente a formações vegetais e agricultura. Os tipos de solo que predominantemente são encontrados na região são os latossolos e cambissolos, enquanto o tipo de relevo que predomina é o de chapada, não ocorrendo terrenos muito acidentados. O clima presente no DF é tropical de savana com duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa, essa última na qual se concentra a precipitação anual, que tem média de 1.500 mm.

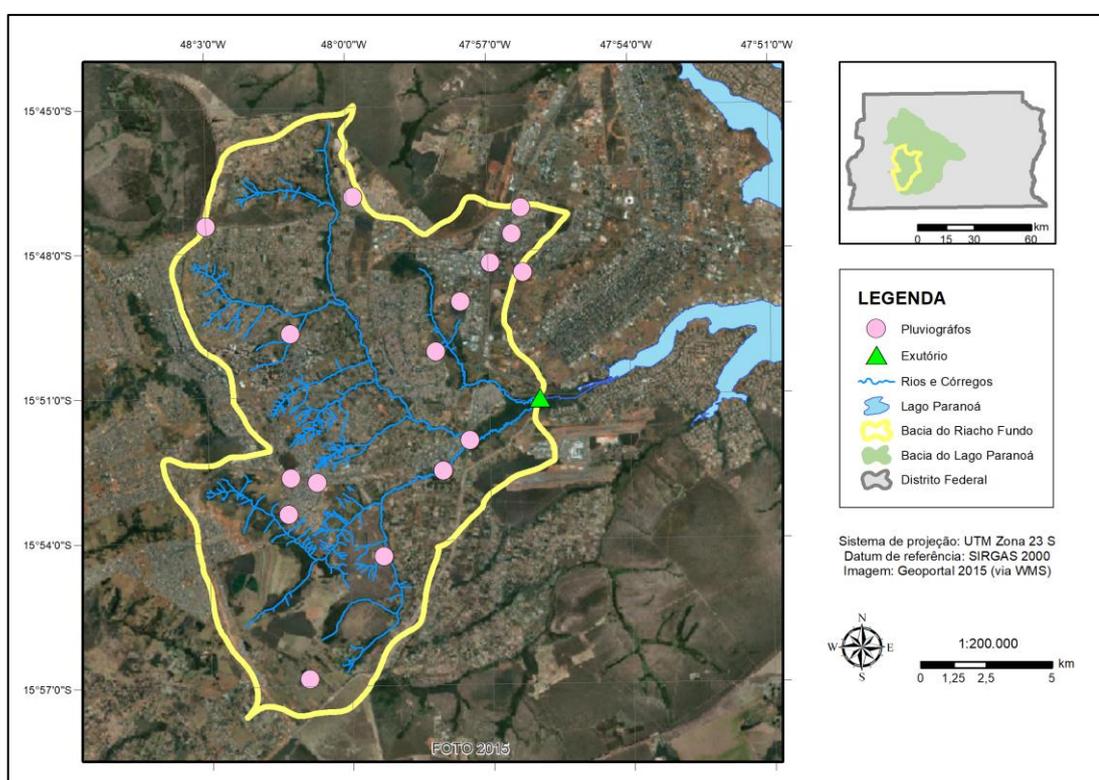
O monitoramento pluviométrico na bacia do Riacho Fundo foi realizado por dezesseis pluviógrafos de balsa distribuídos ao longo da bacia a fim de contemplar adequadamente a área com dados de chuva. Dos 16 pluviógrafos, 14 são operados pela Universidade de Brasília (UnB) e 2 são de órgãos públicos que disponibilizam os dados para *download*. Assim, a densidade resultante das estações da rede de monitoramento pluviométrico presente é de 16,8 km²/estação, valor dentro do recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para áreas urbanas, que é entre

10 e 20 km²/estação (WHO, 2008). Os pluviógrafos utilizados sob responsabilidade de operação por parte da UnB são da marca Onset, modelo RG3-M.

Já o monitoramento fluviométrico foi realizado em seção do riacho próxima ao exutório da bacia, na estação fluviométrica Ponte Aeroporto (60478400), com a utilização de um linígrafo de pressão da Global Water para medição do nível d'água em intervalos de 10 minutos. Realizaram-se ainda campanhas de medição de vazão com uso do medidor acústico RiverSurveyor M9 da Sontek com a finalidade de obtenção da curva-chave da seção.

A Figura 1 apresenta a localização da bacia do Riacho Fundo, assim como das estações de monitoramento pluviométrico onde se encontram os pluviógrafos, com destaque para os pluviógrafos cujos dados foram utilizados neste trabalho.

Figura 1 – Localização da bacia do Riacho Fundo (DF) e dos pluviógrafos utilizados no monitoramento.



Escolha dos eventos e cálculo das intensidades

Para este trabalho foram escolhidos dois eventos que possuíam os dados dos mesmos pluviógrafos disponíveis e que, a partir de uma análise preliminar dos hidrogramas, identificou-se que possuíam vazões de picos similares. Com o objetivo de compará-los, foram calculados os hidrogramas médios para cada evento e selecionadas as 3 horas mais representativas do evento em relação a lâmina precipitada. Esse período foi dividido em 6 intervalos de 30 minutos cada para conseguir visualizar o progresso da distribuição espacial da precipitação na bacia.

Os dados de chuva coletados nos pluviógrafos foram discretizados de 5 em 5 minutos para serem utilizados neste trabalho. Devido a falhas nos equipamentos no período em que ocorreram os eventos analisados, os dados de somente 13 e 14 dos 16 pluviógrafos estavam disponíveis, respectivamente, para o evento do dia 18 e do dia 23.

Tendo em vista que os dados de precipitação estavam em formato de lâmina precipitada, foi feito o cálculo das intensidades de precipitação para os dados de cada um dos pluviógrafos considerados, tanto para o intervalo de tempo de 5 minutos quanto para o intervalo de 30 minutos, esse que foi utilizado na próxima etapa. Além disso, fez-se uma breve caracterização dos eventos quanto às características tanto de precipitação como de vazão.

Interpolação e elaboração de mapas

A interpolação foi realizada com objetivo de obter mapas que representassem a variabilidade espacial da chuva, como uma espécie de sequência fotográfica. Para isso, foi utilizado a Krigagem Ordinária, um método geoestatístico que permite uma análise espacial e temporal de dados correlacionados. O modelo de semivariograma adotado foi o esférico, o mesmo para o qual Wanderley *et al.* (2019) encontraram resultados satisfatórios quando avaliado pela validação cruzada, tendo demonstrado melhor ajuste aos dados de precipitação do que os outros modelos testados pelos autores. Assim, entre os modelos disponíveis, o modelo de semivariograma esférico é o mais indicado.

Para a realização da krigagem foi feita utilização do software de geoprocessamento ArcGIS, aplicando-se a ferramenta de *Kriging*, inserida no conjunto de ferramentas *Spatial Analyst Tools* (ferramentas de análise espacial). Na ferramenta, foi escolhido o modelo ordinário e o semivariograma esférico. A camada com as feições de pontos representando cada pluviógrafo serviu de entrada para a ferramenta, sendo que a informação da intensidade de precipitação correspondente a cada intervalo de 30 minutos estava contida na camada e também foi usada como entrada. Ademais, para facilitar as interpretações dos resultados obtidos, foram feitas isoietas com intervalos de precipitação. Para a criação das isoietas foi utilizada uma ferramenta do mesmo software chamada *Contour with Barriers* (contorno com barreiras), que é uma ferramenta de análise espacial de uma superfície.

Os mapas foram confeccionados a partir dos dados de intensidade precipitação em milímetros por hora para cada posto pluviométrico para os 6 horários diferentes em um intervalo de 3 horas. Assim, cada imagem representa a variabilidade espacial da chuva a cada 30 minutos na bacia do Riacho Fundo. Dessa maneira, cada imagem apresenta a interpolação dos valores de precipitação obtidos em campo, representando o possível comportamento da chuva na bacia.

Elaboração de hietogramas médios e hidrogramas

Elaborou-se hietograma médio com os dados de intensidade de precipitação de cada pluviógrafo discretizados em intervalos de 5 minutos, realizando a média de intensidade em cada horário para obter um hietograma único para plotagem junto ao hidrograma. Em ambos os eventos, também foi destacado um período de 3 horas em 6 intervalos de mesma duração no qual a precipitação foi mais abundante e que corresponde ao mesmo período para o qual foram feitos os mapas de interpolação dos dados. Para esse período, elaborou-se o hietograma médio com a discretização de 30 minutos. Por fim, os hidrogramas foram obtidos a partir dos dados de vazão associados a cada evento, discretizados de 10 em 10 minutos. Todos os gráficos foram elaborados no software Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de comparação entre os dois eventos chuvosos, realizou-se o levantamento das características consideradas mais pertinentes, apresentadas na Tabela 1, para cada evento. A partir da Tabela 1 observa-se que as vazões de pico, precipitação média e máxima foram similares, contudo, as durações da precipitação e as relacionadas à onda de cheia foram diferentes.

Tabela 1 – Características de precipitação e de vazão dos dois eventos chuvosos.

Característica	Evento	
	18/12/2019	23/12/2019
Duração da precipitação (horas)	05:00	03:00
Vazão de pico (m ³ /s)	15,2	18,3
Tempo até o pico (horas)	02:00	03:30
Tempo de base da onda de cheia (horas)	06:10	08:50
Intensidade de precipitação média em intervalos de 30' (mm/h)	1,24	2,83
Intensidade de precipitação máxima em intervalos de 30' (mm/h)	6	6,6

Os hietogramas e hidrogramas de cada evento, apresentados nas Figuras 2 e 3, ilustram as diferenças e similaridades. Observa-se que os formatos dos hidrogramas são parecidos, ou seja, o comportamento da resposta observada no exutório é similar para os eventos, com a diferença de um tempo maior que a vazão permanece próxima ao valor de pico no evento do dia 23/12/2019. Ao observar os hietogramas, nota-se que mesmo apresentando intensidades de precipitação médias e máximas similares, a distribuição temporal da chuva é distinta entre os eventos.

Figura 2 – Hietogramas médios e hidrograma para o evento do dia 18 de dezembro de 2019.

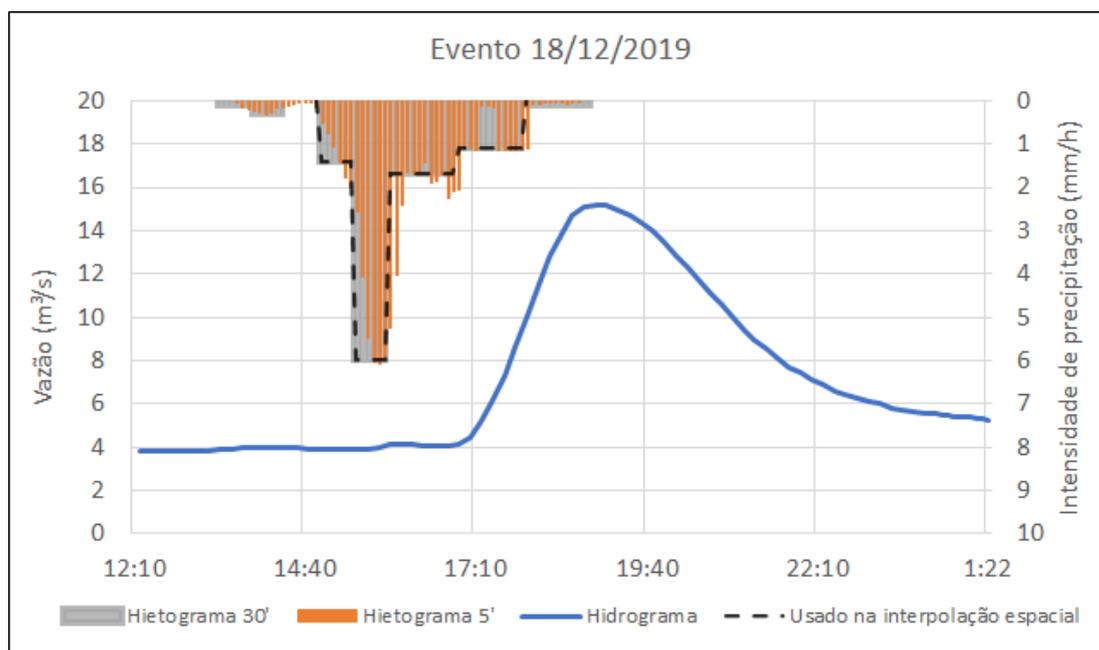
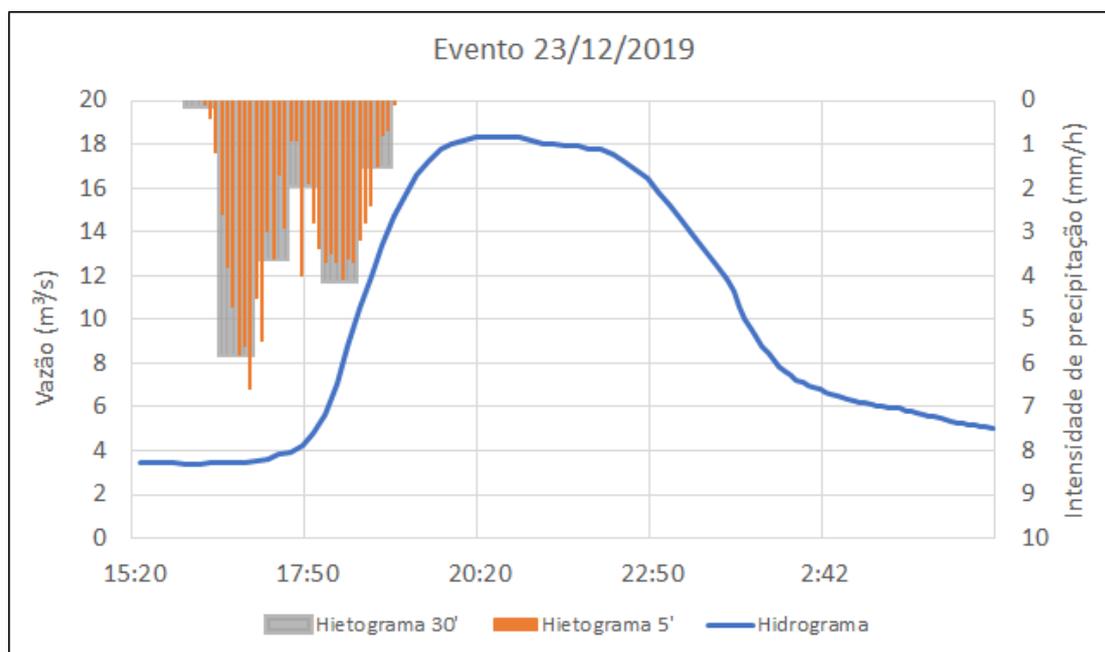


Figura 3 – Hietogramas médios e hidrograma para o evento do dia 23 de dezembro de 2019.



A distribuição espacial da chuva dos dois eventos também mostra que são eventos com comportamentos e variabilidades espaciais diferentes. As Figuras 4 e 5 mostram a evolução do aspecto espacial dos eventos estudados nos 6 recortes correspondentes ao hietograma com intervalo de 30 minutos para cada pluviógrafo. Na Figura 4, observa-se que a chuva do evento do dia 18/12/2019 começou na porção nordeste da bacia, deslocou-se para o centro formando dois pontos de precipitação e durante os últimos três intervalos manteve-se na porção leste. A chuva do dia 23/12/2019, mostrada na Figura 5, apresentou um comportamento espacial bem distinto. Inicialmente, a chuva teve início na porção oeste da bacia deslocando para sul e leste, formando dois focos de chuva. Posteriormente, a partir do horário 17h50, a chuva apresentou maior incidência na porção norte da bacia e foi se dissipando até o fim do evento chuvoso.

Todos os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5 foram obtidos utilizando a krigagem ordinária com semivariograma esférico. Para fins de conferência dos resultados em relação aos valores de intensidade efetivamente medidos nos pontos dos pluviógrafos, realizou-se a interpolação linear. Esse procedimento foi feito somente para verificar se a interpolação por krigagem resultou em representações coerentes. Apenas os primeiros intervalos de cada evento (15h10 para o evento de 18/12/2019 e 16h20 para o de 23/12/2019) não apresentaram resultado considerado satisfatório pela krigagem em comparação à interpolação linear, pois a krigagem resultou em uma intensidade uniforme em toda a bacia, que, apesar de ser próxima à intensidade média calculada entre os pluviógrafos para o intervalo, não corresponde ao que ocorreu na realidade. Nesses primeiros intervalos foi registrada em ambos os casos uma precipitação isolada, com a intensidade de precipitação mais alta concentrada apenas em um ponto e vários pluviógrafos com intensidades muito inferiores ou sem registro de chuva. Os demais intervalos dos eventos resultaram em representação coerente a partir da interpolação por krigagem.

Assim, a ausência de um resultado eficiente para o primeiro intervalo de cada evento pode ser um indício de que a aplicação desse método de interpolação não foi bem sucedida para situações em que há a predominância de intensidades de precipitações baixas e apenas poucos ou só um ponto com intensidade mais alta. Ly *et al.* (2011) ressaltaram que se deve ter cuidado ao aplicar métodos de interpolação em dados de chuva com poucos pontos de amostra de vizinhança, o que também pode

explicar a observação feita para os resultados da interpolação para os primeiros intervalos. Se os pluviógrafos instalados na área que apresentaram falhas e não registraram dados nos eventos estivessem em funcionamento normal e com dados disponíveis, é possível que fossem alcançados melhores resultados, principalmente para os intervalos com precipitação mais isolada.

Analisando os mapas das Figuras 4 e 5 junto aos hietogramas e hidrogramas das Figuras 2 e 3, nota-se que a diferença no tempo de resposta da vazão pode estar relacionada ao local que concentrou maiores intensidades de precipitação no início dos eventos. As observações feitas nesse sentido são que a vazão começa a subir depois de 2 horas do início da porção mais significativa da precipitação no evento de 18/12/2019 e já no evento de 23/12/2019, a resposta é um pouco mais rápida, iniciando o aumento de vazão (subida da onda de cheia) menos de 1,5 hora depois do início da precipitação. No entanto, um fato a se pontuar é que a área na qual a precipitação se concentrou no início do evento do dia 18/12/2019 (a partir da isoietas de 10 mm/h no horário de 15h40) é atendida por rede de drenagem urbana que lança as águas pluviais numa bacia de detenção, que faz o controle da vazão que é lançada no córrego à jusante, na drenagem natural. Assim, apesar de essa área ser relativamente mais próxima à área do exutório do que a área de maior intensidade de precipitação no início do evento de 23/12/2019, ela pode ter um atraso na contribuição para a vazão na saída da bacia.

Outra observação que foi feita é que o evento de 23/12/2019 permanece mais tempo com intensidades de precipitação mais altas incidindo sobre a bacia, explicando o maior tempo que as vazões também permanecem próximas ao valor de pico. Além disso, a chuva incidiu com maior intensidade em áreas mais distantes ao exutório nesse evento, o que pode ter prolongado a onda de cheia, devido ao tempo de transporte das vazões ao longo da bacia.

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

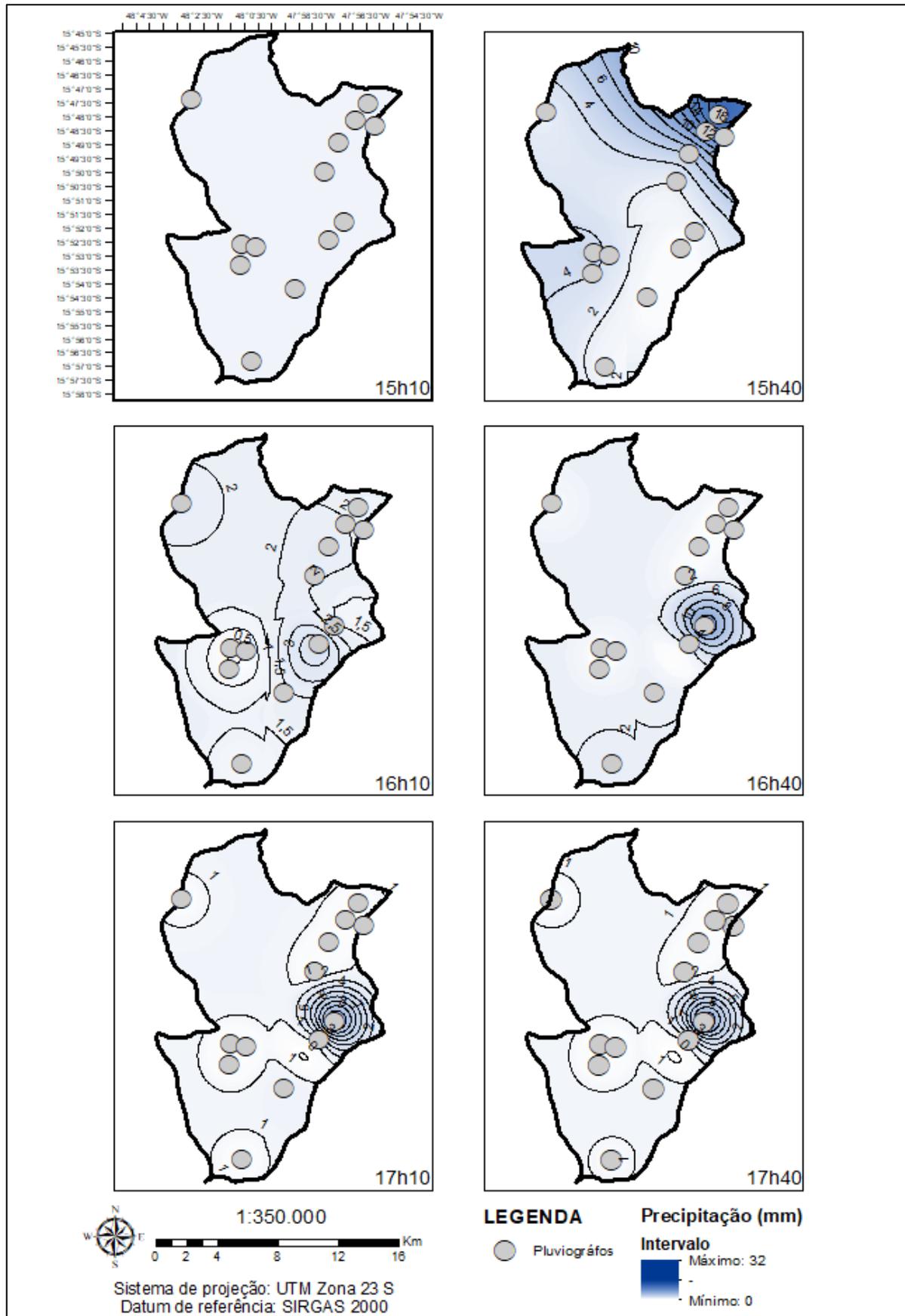
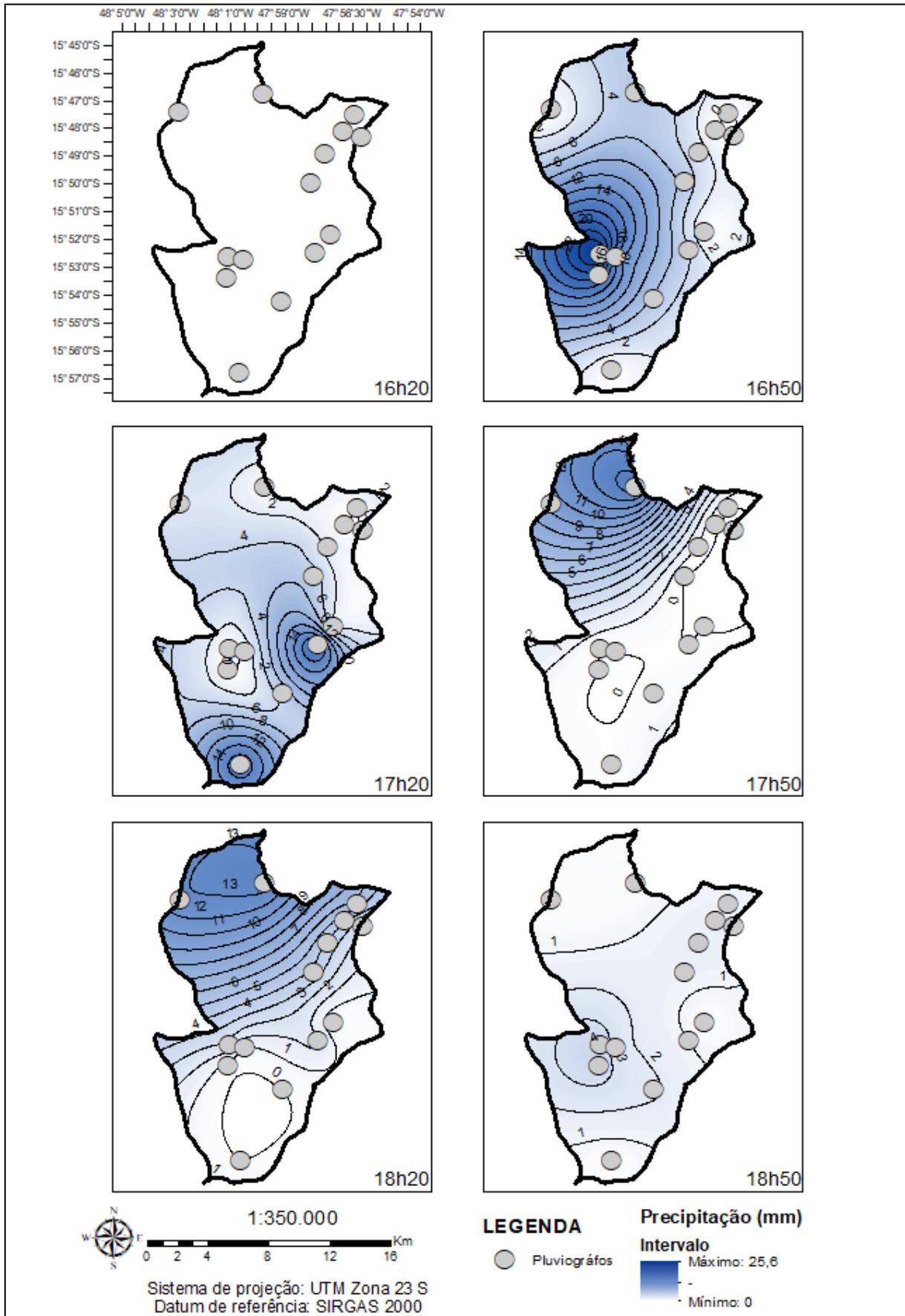


Figura 5 – Resultados da interpolação espacial por krigagem e isoietas para o evento do dia 23/12/2019.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da krigagem ordinária se mostrou adequada para interpolação dos dados de chuva para avaliação do seu comportamento espacial, especialmente quando se possui dados de chuvas representativos e localizados próximos. Assim, a dificuldade em utilizar esse método está associada a dados espaçados e/ou precipitações baixas e pontuais.

Os dois eventos de precipitação analisados tiveram comportamentos bem distintos temporal e espacialmente. O evento do dia 18 apresentou uma chuva com maior distribuição temporal e menor distribuição espacial, característica de um evento mais constante, enquanto o evento do dia 23 apresentou o comportamento oposto, com uma menor variabilidade temporal e maior variabilidade espacial ao longo da bacia, consequentemente apresentando o comportamento de uma chuva mais curta, mais intensa e mais distribuída.

Com o conhecimento da distribuição espacial da chuva ao longo dos eventos decorrente dos mapas de interpolação, foi possível fazer observações sobre os hidrogramas no exutório, como sobre a influência da área na qual ocorre a precipitação na resposta de vazão no exutório, sendo que essa influência deve estar relacionada à distância da área até o exutório da bacia, mas também pode estar ligada a aspectos do manejo das águas pluviais urbanas nela. O contrário, no entanto, não ocorreu, visto que a análise dos hidrogramas por si só não possibilitou deduzir nada sobre o comportamento da chuva na bacia.

Desse modo, cabe assegurar que para entender um evento chuvoso em uma bacia é necessário que ocorra o monitoramento de chuva ao longo de toda área, com uma rede de pluviógrafos bem distribuídos, pois somente a observação da vazão no exutório, apresentada no hidrograma, não é suficiente para interpretar qual foi a variabilidade espacial da precipitação na bacia.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, J. R. P. de, ASSAD E. D. (2005). “*Análise Espacial da Precipitação Pluviométrica no Estado de São Paulo: Comparação de Métodos de Interpolação*”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(2), pp. 377-384.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. (2012). “*Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude*”. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 47(9), pp. 1235-1242.

CARVALHO, D. J.; TSUJI, T. M.; COSTA M. E. L.; KOIDE, S. (2017). “*Monitoramento das chuvas em áreas urbanas*” in Anais do XI Encontro Nacional de Águas Urbanas, Belo Horizonte-MG, jul. de 2017.

CUNHA, A. M.; LANI, J. L.; SANTOS, G. R.; FILHO, E. I. F.; TRINDADE, F. S.; SOUZA, E. (2013). “*Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem*”. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 48(9), pp. 1179-1171.

LY, S.; CHARLES, C.; DEGRÉ, A. (2011). “*Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium*”. Hydrology Earth System Sciences, 15, pp. 2259-2274.

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

NUNES, G. (2016). “Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade da água da bacia do Lago Paranoá – DF”. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 148 p.

PORTO, M.; MARTINS, J. R. S.; ARMELIN, L.F. (2009). “Monitoramento em Drenagem Urbana” in *Manejo de águas pluviais urbanas*. Org. por Righetto, A. M., ABES, Rio de Janeiro-RJ, 2009, pp. 76-111.

VIOLA, M.R.; MELLO, C.R. de; PINTO, D.B.F.; MELLO, J.M. de; ÁVILA, L.F. (2010) “Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(9), pp. 970-978.

WANDERLEY, H. S.; CARVALHO, F. O.; AMORIM, R. C. F.; CAVALCANTI, J. R. A.; SANTOS, R. R. C. (2009). “Análise geoestatística da precipitação para o estado de Alagoas” in *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande - MS, nov. de 2009.

WHO - World Meteorological Organization. (2008). “Methods of observation” in: *Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information*. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, pp. 24-27. (WMO - n. 168).

AGRADECIMENTOS – Agradecemos à CAPES, CNPq ANA, FAPDF, FINEP, FINATEC e FUNAPE pelo apoio ao projeto de pesquisa a que este trabalho está associado; e à ADASA e CAESB pelo apoio e dados fornecidos para o desenvolvimento do trabalho.