

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO USANDO MODELAGEM HIDRODINÂMICA

*Bruno, L. S.<sup>1</sup>; Oliveira, P. T. S<sup>2</sup>; Matos, T. S.<sup>3</sup>*

#### **Resumo**

A ocorrência de inundações em centros urbanos tem se tornado cada vez mais frequente, no entanto, poucas cidades possuem sistemas de alerta de inundações. No desenvolvimento de sistemas de alerta é fundamental a calibração de um modelo hidrodinâmico baseado em dados observados. Assim, neste estudo avaliamos a aplicabilidade do modelo hidrodinâmico HEC-RAS (1D-2D) para a determinação de áreas de inundação na bacia do Córrego Sóter, em Campo Grande, MS. Além disso, avaliou-se o comportamento dos canais e desempenho das obras de infraestrutura de drenagem em minimizar as vazões de pico do canal. Para tanto, foram utilizados dados topográficos (modelo digital de superfície), levantamento das seções dos canais e obras hidráulicas e imagens obtidas por aerofotogrametria. O modelo foi calibrado a partir de um evento de precipitação extremo do dia 27/02/2010 e posteriormente foram feitas simulações variando o período de retorno (50 e 100 anos) e a construção de obras estruturais na bacia. Verificou-se que o modelo foi bem-sucedido em sua tarefa, uma vez que as cotas de nível d'água foram condizentes com o relatado por moradores em um estudo local, evidenciando a melhoria da capacidade drenante na bacia devido as intervenções de engenharia realizadas, em todos os cenários avaliados.

**Palavras-Chave** – HEC-RAS; Inundações; Modelagem Urbana.

#### **Abstract**

The occurrence of floods in urban centers has become increasingly frequent, however, few cities have flood warning systems. In the development of flood systems it is fundamental to calibrate a hydrodynamic model based on observed data. Thus, in this study we evaluated the applicability of the hydrodynamic model HEC-RAS (1D-2D) for the determination of flood areas in the Córrego Sóter basin, in Campo Grande, MS. In addition, the behavior of the channels and performance of the drainage infrastructure works were evaluated in minimizing the peak flows of the canal. For that, topographic data (surface digital model), survey of sections of canals and hydraulic works and images obtained by aerial photogrammetry were used. The model was calibrated from an extreme precipitation event on 02/27/2010 and simulations were carried out, varying the return period (50 and 100 years) and the construction of structural works in the basin. It was verified that the model was successful in its task, since the quotas of water level were consistent with the one reported by residents in a local study, evidencing the improvement of the draining capacity in the basin due to the engineering interventions carried out, in all scenarios evaluated.

**Palavras-Chave** – HEC-RAS; Floods; Urban Modelling.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, mestrando - PPGTA/UFMS. Leonardo.bruno@ufms.br

<sup>2</sup> Doutor, professor adjunto UFMS. Paulotarsoms@gmail.com

<sup>3</sup> Doutor. Engtms@ufms.br

## INTRODUÇÃO

Inundação em áreas urbanas provenientes de chuvas extremas tem causado perdas materiais, econômicas, ambientais e humana em diversos locais ao redor do mundo. É provavelmente o mais devastador, difundido e frequente desastre natural presente na sociedade humana (TENG et al., 2017).

Estima-se que o prejuízo causado por inundações no Brasil alcançou 90 milhões de dólares só no ano de 2016, afetando de alguma forma cerca de 27 milhões de pessoas (UCL/CRED, 2016). Em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, problemas com inundações são recorrentes nos noticiários e mídias, em eventos de grandes transtornos à população.

Ao longo da história, tem-se empreendido significativo esforço para compreender, avaliar e prever eventos de inundação e seus impactos. Modelos computacionais tem sido desenvolvidos para atender a essa finalidade. Como as inundações representam uma parte significativa do número total de catástrofes naturais registradas no mundo, e nos últimos 30 anos essa proporção tem aumentado (FREER et al., 2011), o desenvolvimento e aplicação dos modelos de inundações tem se tornado um esforço global.

Esforços sistemáticos dentro da comunidade científica desde a década de 1970 melhoraram a capacidade de modelagem de inundações. Os modelos são amplamente utilizados no mapeamento de risco de inundações (RAMIREZ et al., 2016), na avaliação dos danos causados por inundações (SILVESTRO et al., 2016), para quantificar o risco econômico de inundações (GARROTE; ALVARENGA; DíEZ-HERRERO, 2016) e na previsão de inundações em tempo real (NESTER; KOMMA; BLOSCHL, 2016).

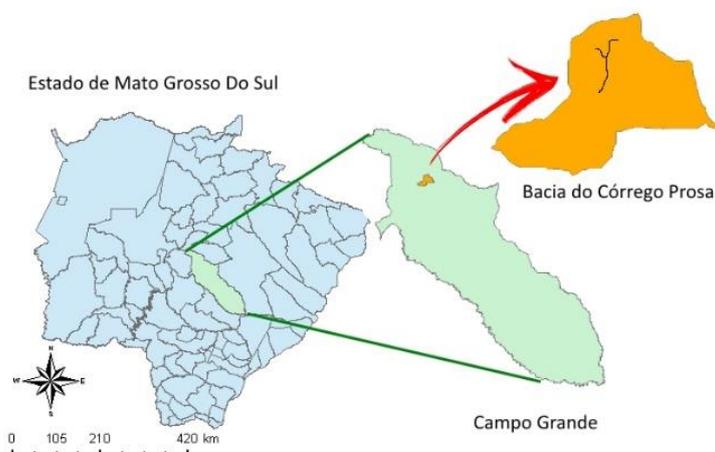
É importante observar que inundações em área urbana necessitam de uma abordagem de modelagem diferente daquela para inundações fluviais. As áreas urbanas contêm estruturas de pequena escala, como ruas e edifícios, que não são levadas em consideração nos estudos normais sobre planície de inundação de rios. Portanto, maior resolução é necessária para representar as características da cidade. Este passo induz maior tempo de processamento computacional, mesmo se a área urbana for menor do que para uma planície de inundação de rio (HENONIN et al., 2013).

A aplicação dessas ferramentas no âmbito de um sistema de previsão de cheias e áreas de inundação ainda são deficientes no Brasil, apesar de ser um fenômeno recorrente principalmente nos centros urbanos. A cidade de Campo Grande - MS, por exemplo, tem sido alvo de inundações em diferentes pontos da cidade, causando muitos prejuízos para os habitantes. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade do modelo hidrodinâmico HEC-RAS (1D) para a determinação de áreas de inundação na bacia do Córrego Sóter, em Campo Grande, MS.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Córrego Sóter é uma sub-bacia do Córrego Prosa, na área urbana de Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul no Brasil. Essa bacia possui uma área de 7,536 km<sup>2</sup>, com variações de áreas verdes (parques preservados) a regiões densamente urbanizadas. Sua nascente se encontra no Parque Ecológico do Sóter e possui um único tributário, o Córrego Pindaré, que aflui por quase 0,5 km, até sua descarga no canal principal.

Figura 1 - Mapa da região de estudo (ilustrativo). Destaque a bacia do Córrego Prosa, e o canal de estudo, Sóter.



## METODOLOGIA

O HEC-RAS (River Analysis System) é um software desenvolvido pelo US. Army Corps of Engineers, de domínio público, disponibilizado online em sua página oficial.

Nas simulações de vazão constante, possui como cerne a resolução numérica da equação de energia (em uma dimensão), sendo que as perdas de carga do sistema são determinadas através da equação de Manning, juntamente com os coeficientes de perda devido a contração e expansão do fluxo. (BRUNNER, G. W., 2016).

Para realizar as computações em regime transiente e com fluxo gradualmente variado, o modelo resolve as equações de Saint-Venant (conservação de massa e de momento), também de forma numérica (FERREIRA, D. M., et. al., 2017).

O programa oferece uma interface intuitiva, na qual todos dados são convergidos e dispostos. Contudo, para aplicações mais específicas, como a modelagem urbana, o gerenciador de geometria não possui ferramentas suficientes, principalmente para desenho e georreferenciamento. Para isso, aplicamos uma extensão do programa, o HEC-GeoRAS.

Tendo definido no programa o arquivo TIN do modelo numérico de superfície, iniciou-se o desenho e definição das propriedades da bacia, incluindo o eixo dos canais, seções transversais, caminhos de fluxo, estruturas hidráulicas, áreas de fluxo inefetivo e por fim, as regiões de uso do solo.

A camada de uso do solo permite a determinação dessas informações, desenhando as regiões com diferentes coeficientes de Manning ( $n$ ), para cada tipo de superfície. Para a demarcação destas áreas, foi utilizado o recurso de polígonos de polilinhas, de forma manual. É um processo que depende também da qualidade da imagem aérea que se está utilizando. Os coeficientes de Manning foram extraídos da tabela 3-1 do manual de referência hidráulica do HEC-RAS, de acordo com a configuração do canal nas seções de análise:

Tabela 1 – Coeficientes utilizados.

<i>Tipo de Terreno</i>	<i>n</i>
Asfalto Bom	0.013
Asfalto Ruim	0.016
Calçada de Concreto	0.016
Canal Lento	0.05
Canal Limpo	0.03
Concreto Liso	0.013
Concreto Rugoso	0.016

Aterro	0.024
Gabião	0.035
Gramado Curto	0.027
Margem Vegetada	0.06
Margem Limpa	0.035
Obstrução	0.055
Planície com Pastagem	0.04

O programa ainda oferece a criação de várias outras propriedades, porém não existem neste canal. Após essas etapas os dados foram exportados do ambiente GIS para o HEC RAS.

Figura 2 – Demarcação do canal, seções, obstruções, estruturas e coeficiente de Manning.



Nas simulações no HEC-RAS de uma maneira geral, o núcleo para as computações são as seções transversais, que foram obtidas dos órgãos oficiais da cidade, e combinadas com as que foram extraídas do modelo digital de elevação (MDE).

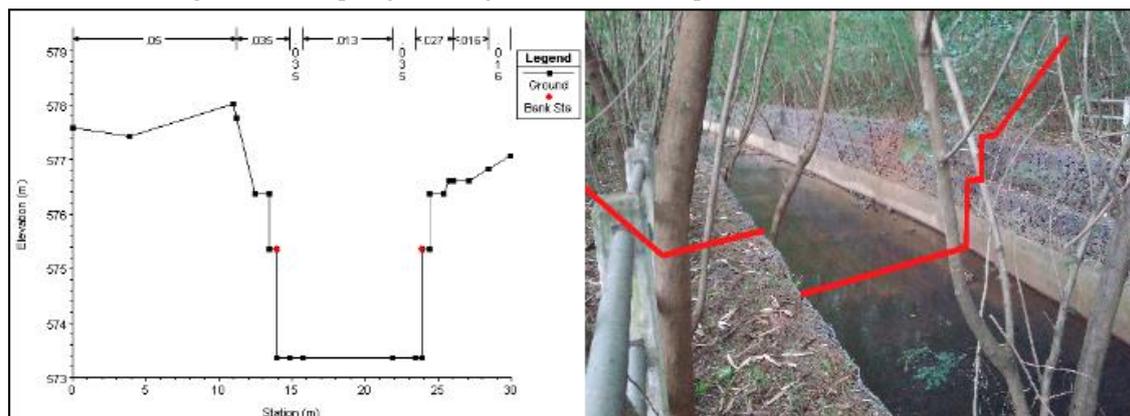
Para cada linha de seção transversal desenhada no GeorRAS, ao qual um MDE foi incorporado, o programa extrai automaticamente a forma da seção. Porém, em algumas situações (principalmente nos locais onde o canal é artificial), a qualidade da mesma é precária, sendo substituída então por uma melhor, extraída do banco de dados da Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano de Campo grande (PLANURB).

Este foi o caso desta modelagem, no qual grande parte das seções naturais foram assimiladas do MDE (região do alto Sóter e Córrego Pindaré), enquanto nos trechos canalizados e próximos a estruturas, utilizou-se as informações obtidas da PLANURB (Secretaria Municipal de Planejamento Urbano).

Vale notar que os coeficientes de rugosidade foram importados do GIS, por trecho, ao longo da linha da seção. A determinação do alcance do canal principal (*MainStream Bank Stations*) foi feita manualmente, adicionando dois pontos (limite esquerdo e direito) na interface de modificação gráfica.

Para validar o uso da rugosidade utilizada, todas as seções foram mapeadas em campo, identificando visualmente qual o tipo de terreno que está acontecendo (principalmente nas áreas canalizadas).

Figura 4 – Comparação da seção modelada (a esquerda), com a real (a direita)



Como já relatado, o córrego possui intervenções ao longo de sua trajetória, de modo que todas estas foram incluídas na simulação (dependendo do cenário de avaliação).

Em primeiro lugar temos as seções com pontes. Em toda a extensão do Sóter, existem 5 pontes, que na verdade fazem a ligação dos cruzamentos das vias secundárias ao canal. Destas, somente uma possui apoio em pilares a mostra, e as outras são sustentadas apenas pela contenção junto com o aterro.

Para sua inserção no modelo, definiu-se a extensão da ponte, juntamente com a cota de elevação do topo do tabuleiro, tudo através do MDE. Também é necessário a cota inferior da laje da ponte, que foi obtida subtraindo a elevação da face superior o valor da sua espessura (1 metro).

Além disso, através do GIS obtivemos a distância da ponte em relação a seção transversal de montante, bem como o vão transversal, informações necessárias para sua implantação.

Em relação as barragens, todas tiveram suas geometrias e cotas inseridas, nas seções com localização avaliadas nas imagens aéreas da cidade. Cada barragem possui uma área vazada no fundo, que atua como um orifício de descarga para permitir a passagem da vazão do córrego. Na implantação do modelo, este descarregador foi configurado como um portão, com as dimensões de projeto, bem como seu coeficiente de descarga e cota do radier. Uma vantagem da utilização desse tipo de abertura é a possibilidade de controlar a altura de abertura inversa, para avaliar o impacto dos stop-logs no fluxo.

Figura 3 - Visão real da configuração no início da Av. Nelly Martins (esquerda) e configuração modelada (a direita).



De acordo com um relatório da prefeitura municipal (PMCG, 2011), após os eventos históricos de chuva de fevereiro de 2010, houve as obras emergenciais de infraestrutura de drenagem que culminou na canalização do córrego e na construção de três barragens de amortecimento. Atualmente, existem mais duas barragens, com stop-logs.

Com isso, planejamos 6 cenários possíveis para a execução das simulações, com 3 chuvas, com período de retorno de 25 anos (chuva histórica de 2010), 50 anos, e 100 anos além de 2 configurações de bacia:

- Configuração 1: Três barragens de amortecimento e canalização da jusante (obras emergenciais de 2011);
- Configuração 2: Cinco barragens de amortecimento (duas com stop-logs) e a canalização da jusante (atual).

Dado a falta de informações iniciais de nível e vazão, os dados utilizados serão as mesmas determinadas no relatório municipal.

Para determinação das chuvas utilizou-se a equação Intensidade, Duração e Frequência (I-D-F), ajustada para o município de Campo Grande, MS (PDDU, 2008), e hietogramas de projeto baseados no método dos blocos alternados:

$$I = (1973,15 \cdot T^{0,178}) / (t + 22)^{0,8577} \quad (1)$$

Onde:

I – Intensidade da chuva (em mm/h);

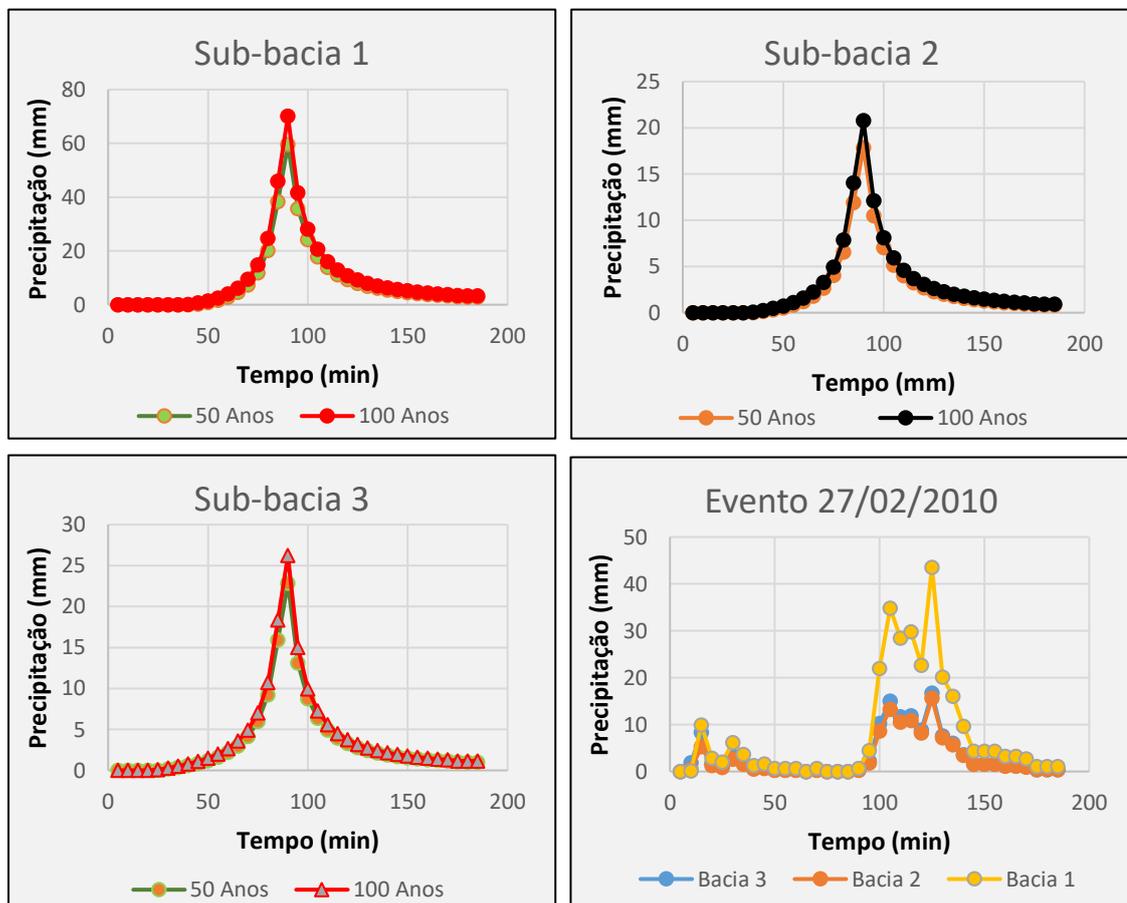
T – Tempo de retorno (em anos);

t – Duração do fenômeno (em minutos).

Revertendo a precipitação medida no evento de 2010 para um  $t = 5$  min e  $i = 206$ mm/h, obtivemos o valor de tempo de retorno (TR) de 24,5 anos. Aplicando um TR de 50 anos e 100 anos, ambos com a mesma duração, obtivemos uma precipitação máxima de 234mm/h e 265mm/h respectivamente. Os hietogramas de projeto possuem uma duração de evento baseado na duração do evento de calibração.

Para determinar a vazão para aplicação no modelo, utilizou-se o método do SCS-CN, para três sub-bacias dentro da bacia do Sóter.

Figura 4 – Hietogramas de projeto para os cenários de teste, por sub-bacia. No canto inferior direito, hietograma do evento real de calibração.

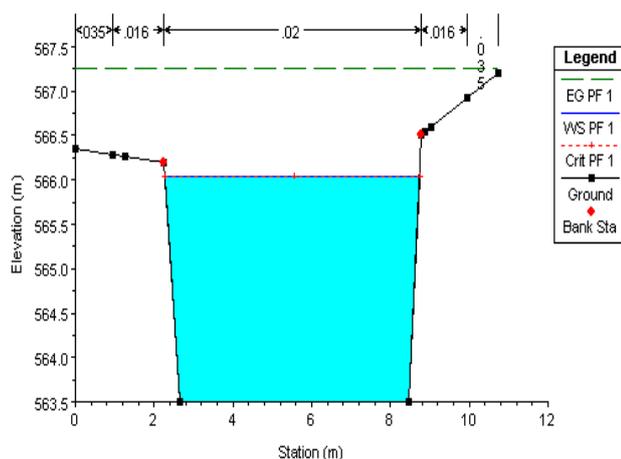


Para calibrar o modelo, comparamos o resultado da cota de inundação do relatório da prefeitura (PMCG, 2011), em um ponto conhecido, com a processada pelo HEC-RAS. Para simular, utilizamos o regime permanente, aplicando a vazão de pico nos trechos correspondentes. Também se ordenou a computação em regime misto, uma vez que no canal há momentos em que o fluxo se torna muito rápido.

As condições de contorno utilizadas no montante e na jusante, foi a profundidade normal (Normal Depth), calculada a partir da hipótese de que a declividade da linha de energia é igual a declividade do leito do canal. A declividade é maior no montante (0.03m/m) e menor na jusante (0.017m/m). Entre os trechos, a condição de contorno utilizada foi a própria junção que une os trechos.

O ponto escolhido foi a seção exutório, mais a jusante, que teve para o evento de 2010, um nível de água de  $568.5\text{m} - 566\text{m} = 2.5\text{m}$ . Para calibrar o modelo, variamos o valor do  $n$  de Manning, ao longo das seções, até que se obteve o valor correspondente na elevação.

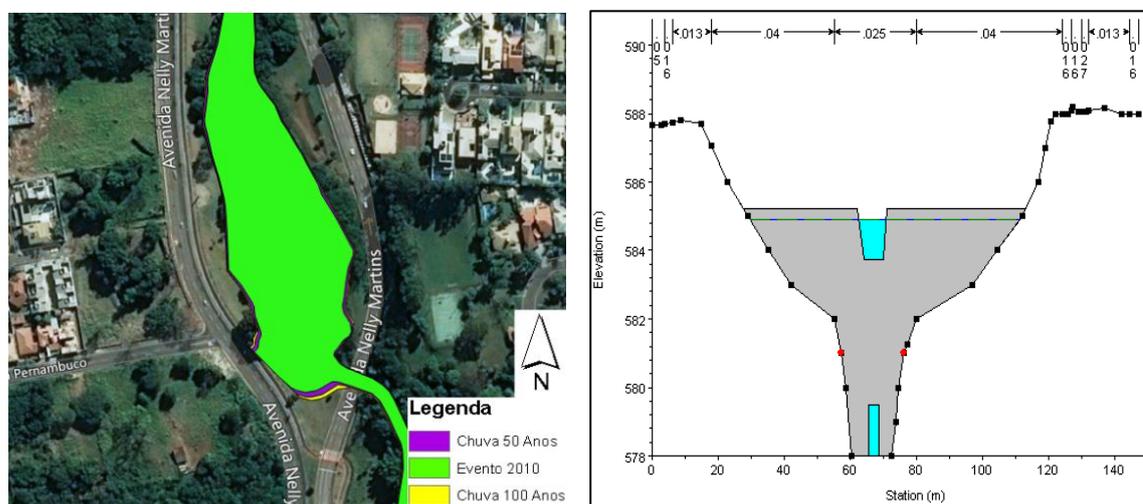
Figura 5 - Lâmina d'água observada no exutório par ao evento 27/10/2010



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibrado, rodamos o modelo para a primeira configuração de bacia. A vazão foi colocada de acordo com cada sub-bacia do córrego, com as mesmas considerações na calibração. Em seguida, adicionou-se as duas barragens restantes. Na chuva de 2010, vemos pelo mapeamento que as obras emergenciais atenderam a demanda e o canal não transbordou, em nenhum ponto. Ainda assim, todas as barragens funcionaram plenamente, com água vertendo (ver Figura 11).

Figura 6 - Mancha de inundação para a região das últimas barragens, no cenário 2 (esquerda), e a visão frontal da última barragem (direita).



Mesmo em condições de precipitação menos intensas, é possível observar regiões críticas, principalmente na área de alagamento da última barragem no sentido do fluxo, na jusante do trecho envelopado, e na seção da ponte da Rua Antônio Maria Coelho.

Com relação a chuva com período de retorno de 50 anos (intensidade de 234 mm/h), observa-se que em alguns pontos o sistema o canal não consegue drenar completamente o volume que chega pela drenagem, excedendo a calha do canal.

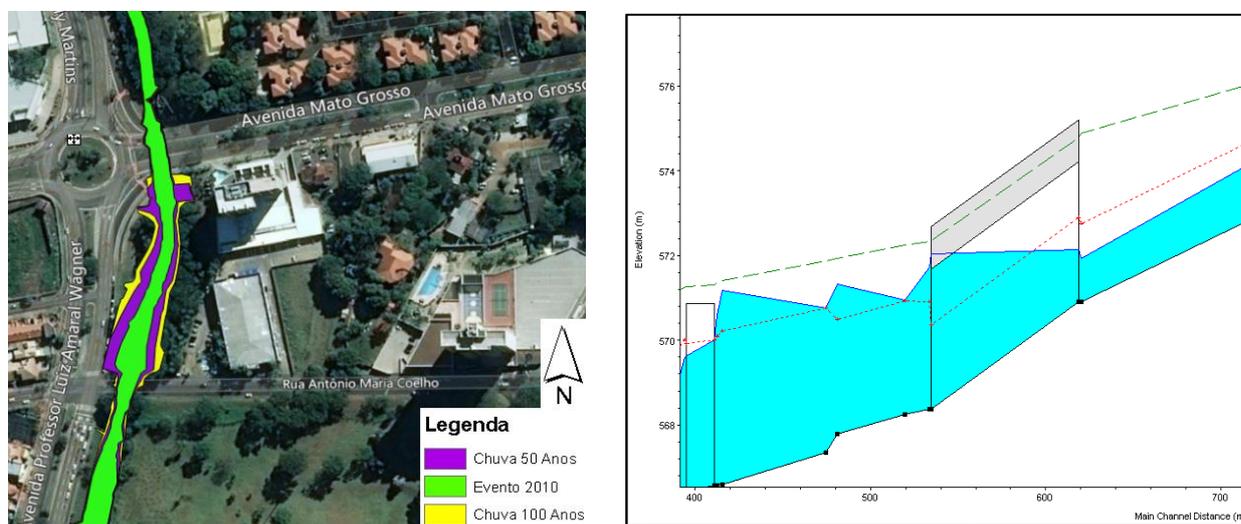
Dentre os locais em que a água chegou à via, temos a terceira barragem no sentido a montante, além da Via Parque, nas proximidades do cruzamento da rua Antônio Maria Coelho. Ainda assim, a maior parte do trecho canalizado se manteve estável com um bom fluxo. Nota-se também a ocorrência de pressurização do trecho final da seção fechada.

No evento com período de retorno 100 anos (intensidade de 265 mm/h), notamos que o sistema de drenagem não consegue suportar todo o volume e transborda em vários pontos. As três barragens possuem água passando por cima da crista, alagando a faixa adjacente na Avenida Nelly Martins, com uma lâmina d'água que varia entre 6cm e 30cm no nível da rua. Como todas as barragens estão a montante das pontes, nenhuma foi afetada.

As seções canalizadas a jusante têm o mesmo comportamento agudo da chuva de 50 anos. A região anterior a Avenida Mato Grosso manteve-se intacta, com o nível de água dentro do canal, mostrando que a redução da rugosidade foi eficiente na eliminação do risco de inundação.

O problema maior, porém, é nas seções posteriores a avenida. Com o incremento de fluxo das galerias pluviais que drenam a região superior do bairro Vivenda do Bosque, o canal não suporta e tem pontos em que a água sobe até a Via Parque (Figura 8).

Figura 8 -Mancha de inundação para a região a jusante da Av. Mato Grosso, no cenário 2 (esquerda). A avenida paralela ao fluxo, é localmente conhecida como Via Paqrue. Perfil longitudinal do trecho (direita).

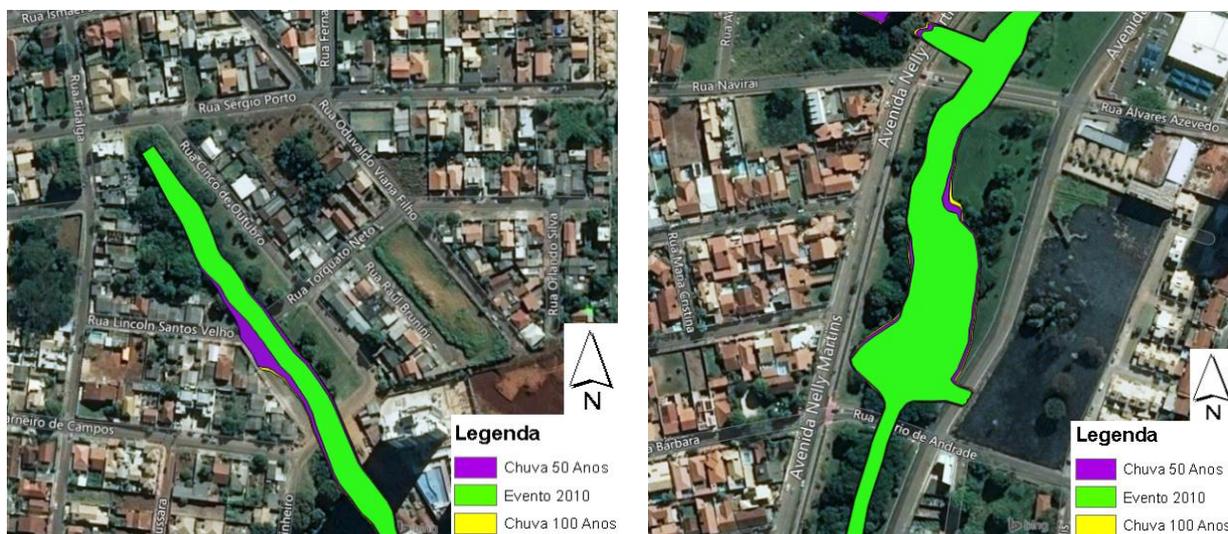


Outro transtorno é a pressurização no final da seção canalizada, devido ao remanso gerado pela seção da ponte da rua Antônio Maria Coelho, que também sofre do mesmo problema, além de extravasamento, com a água escorrendo pelo tabuleiro.

Em relação a utilização das barragens, houve um decréscimo da mancha de inundação da ordem de 11,6% na chuva esperada para 100 anos, 14,2% no evento de tempo de retorno de 50 anos e 8,6% no fenômeno ocorrido em 2010, atestando assim, sua eficácia. Essa diferença nos valores de áreas mapeadas em relação a chuva de 2010, se devem a variabilidade da chuva, uma vês que nesta, o a distribuição da precipitação foi mais distribuída no tempo, permitindo o escoamento do fluxo diminuindo o impacto das barragens.

É válido ressaltar também que a enchente afetará moradores da Rua Luís Goes (Figura 9), na margem direita do Córrego Pindaré, devido à geometria de sua calha, muito esparsa nessa direção.

Figura 9 - Mancha de inundação para a região do Córrego Pindaré a montante (esquerda) e na foz (direita).



## CONCLUSÃO

Neste estudo avaliamos a aplicabilidade do modelo hidrodinâmico HEC-RAS (1D-2D) para a determinação de áreas de inundação na bacia do Córrego Sóter, em Campo Grande, MS. O modelo foi calibrado a partir de um evento de precipitação extremo do dia 27/02/2010 e posteriormente foram feitas simulações variando o período de retorno (50 e 100 anos) e a construção de obras estruturais na bacia.

Verificamos que o impacto das obras de drenagem realizados são suficientes para evitar as inundações na região do baixo Sóter. No entanto, chuvas com período de retorno superior a 50 anos poderão promover vários pontos de inundação ao longo do canal.

Vale ressaltar a boa performance das represas, que conseguiram desempenhar o seu papel de amortecimento do volume escoado, reduzindo o nível d'água nas regiões de jusante em cerca de 2m.

Porém ainda fica o alerta para as áreas mais vulneráveis, como as proximidades da última ponte e a jusante da galeria fechada, que recebe uma injeção muito pesada de vazão da rede de drenagem, durante os eventos de chuva.

Além disso, verificamos a boa trabalhabilidade do modelo hidrodinâmico HEC-RAS para a determinação das áreas prováveis de alagamento nesta região, que pode facilmente ser estendida para toda a bacia, na presença de mais dados de campo. Assim, verifica-se o potencial para diversas outras aplicações, que variam desde a averiguação de transporte de sedimento, ou até mesmo o uso paralelo com modelos hidrodinâmicos, em cascata, a fim de por exemplo, determinar o comportamento dos canais em certas situações meteorológicas, embasando as autoridades locais na tomada estratégica de decisões para o gerenciamento de emergências.

## AGRADECIMENTOS

A Prefeitura Municipal de Campo Grande, por meio da PLANURB e SEMADUR, e ao Prof. Me. Enio Shinma (EcoPrime – Engenharia em Meio Ambiente), por disponibilizar os dados, indispensáveis para a criação do modelo.

## REFERÊNCIAS

NESTER, T.; KOMMA, J.; BLÖSCHL, G. Real time flood forecasting in the Upper Danube basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 64, n. 4, p. 404-414, 2016.

ARROTE, J.; ALVARENGA, F. M.; DÍEZ-HERRERO, A. *Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models*. *Journal of Hydrology*, v. 541, Part A, p. 611-625, 2016.

SILVESTRO, F. et al. *The flash flood of the Bisagno Creek on 9th October 2014: An “unfortunate” combination of spatial and temporal scales*. *Journal of Hydrology*, v. 541, Part A, p. 50-62, 10// 2016.

FREER, J. et al. *Flood risk and uncertainty*. In: (Ed.). *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*: Cambridge University Press, 2011. p.190-233.

TENG, J. et al. *Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis*. *Environmental Modelling & Software*, v. 90, p. 201-216, 4// 2017.

HENONIN, J. et al. Real-time urban flood forecasting and modelling - a state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, v. 15, n. 3, p. 717-736, 2013.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DIASTERS (CRED). “*Annual Disaster Statistical Review 2016*.” Belgium, 2016. Disponível em: <[http://emdat.be/sites/default/files/adsr\\_2016.pdf](http://emdat.be/sites/default/files/adsr_2016.pdf)> Acesso em: 22 jun. 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPO GRANDE. *Simulação hidrológica para avaliação das inundações na bacia do Prosa em Campo Grande-MS*. Processo n° 96864/2010-91. Campo Grande, 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPO GRANDE. *Plano diretor de drenagem urbana de Campo Grande*. Decreto n° 12680-2015. Campo Grande, 2015

BRUNNER, G. W. *HEC-RAS – River Analysis System. User’s Manual*. US Army Corps of Engineers – HEC: Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. Fev. 2016.

BRUNNER, G. W. *HEC-RAS – River Analysis System. Reference Manual*. US Army Corps of Engineers – HEC: Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. Fev. 2016.

ACKERMAN, T. C. *HEC-GeoRAS – GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGis 10. User’s Manual*. US Army Corps of Engineers – HEC: Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. Mar. 2012.