

# COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM NO MATO GROSSO UTILIZANDO DADOS TOPOGRÁFICOS OBTIDOS POR LEVANTAMENTO EM CAMPO E DADOS ABERTOS

## COMPARISON BETWEEN A MATO GROSSO'S HYPOTETICAL DAMBREAK STUDIES USING TOPOGRAPHIC DATA OBTAINED THROUGH FIELD SURVEY AND OPEN DATA

Letícia Aragón Zülke<sup>1</sup> Marcelo Giulian Marques<sup>2</sup> Éricson Rojahn<sup>3</sup>

### RESUMO

O crescente número de barragens no país e as exigências legais quanto à gestão de segurança dessas barragens conforme descrito na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) criada pela Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, tornaram essencial o estudo de ruptura hipotética de barragens (*Dam break*), por parte de seus empreendedores, de forma a conjecturar seus possíveis impactos. Este artigo se propõe, portanto, a estudar como a variabilidade da base topográfica influencia o resultado de uma simulação de ruptura hipotética de uma barragem localizada em Mato Grosso, feita com auxílio do *software* de modelagem hidrodinâmica *HEC-RAS* variando-se as bases topográficas do modelo entre dados de levantamento em campo e dados abertos. Ainda, destaca-se a importância do Modelo Digital de Elevação (MDE) na precisão das simulações de ruptura de barragens, demonstrando que diferentes modelos topográficos resultam em variações significativas nos resultados das análises de inundação. A disponibilidade de dados topográficos abertos pode ser uma alternativa viável para a realização desses estudos, especialmente em regiões onde dados locais detalhados são limitados.

**Palavras-chave:** Gestão de segurança de barragens; ruptura hipotética de barragem; *dambreak*; *HEC-RAS*.

### ABSTRACT

The increasing number of dams in the country and the legal requirements regarding the management of dam safety as described in the National Policy on Dam Safety (PNSB) created by Federal Law nº 12,334 of September 20, 2010, have made the study of hypothetical dam breaches (*Dam break*) essential for their owners to conjecture their possible impacts. This paper aims, therefore, to study how the variability of the topographic base influences the result of a Mato Grosso's hypothetical dam break simulation, using the hydrodynamic modeling software *HEC-RAS* with varying topographic bases between field survey data and open data. Furthermore, the importance of the Digital Elevation Model (DEM) in the accuracy of dam break simulations is highlighted, demonstrating that different topographic models result in significant variations in flood analysis results. The availability of open topographic data can be a viable alternative for conducting these studies, especially in regions where detailed local data is limited.

**Keywords:** Dam safety management; hypothetical dam break; dam break; *HEC-RAS*.

---

<sup>1</sup> Graduanda no curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais (UFBA);

[leticia.zulke@gmail.com](mailto:leticia.zulke@gmail.com)

<sup>2</sup> [mmarques@iph.ufrgs.br](mailto:mmarques@iph.ufrgs.br)

<sup>3</sup> [ericson.rojahn@gmail.com](mailto:ericson.rojahn@gmail.com)

## 1.INTRODUÇÃO

Identificar, mais fidedignamente o possível, as consequências de uma ruptura de barragem se tornou fundamental em termos de gestão de segurança, sobretudo depois de promulgada a Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), tornando obrigatório ao empreendedor de barragens a apresentação do mapa de inundação quando exigido pelo órgão fiscalizador. Segundo a direta interpretação da legislação brasileira, ainda que sejam aplicadas às barragens as melhores técnicas construtivas de engenharia, não é possível admitir risco zero de falha da estrutura ou dano zero, de forma que se torna parte de sua gestão de segurança antever os impactos de uma eventual ruptura. Além disso, essas análises de inundação, cujo subproduto é o mapa de inundação, ensejam a categorização temporária das barragens em diferentes classes que representam o quão danoso seriam as consequências de suas falhas e quais as medidas legais serão exigidas tempestivamente do empreendedor em atendimento à gestão de segurança da barragem de forma a evitar justamente sua falha e prejuízos imateriais e materiais. Esta categorização, um dos instrumentos da PNSB, deve ser feita pelo órgão fiscalizador de barragem mediante a análise desses estudos de ruptura e mapas de inundação. (Brasil, 2010).

A avaliação e identificação, portanto, pertinentes aos modelos de análises de ruptura hipotética de barragens ou, simplesmente, *Dam Break*, têm sido definidas, basicamente, a partir de modelos matemáticos apoiados na hidráulica combinados aos aspectos geométricos locais, cuja representação computacional é denominada Modelos Digital de Elevação (MDE), podendo ser do tipo Modelo Digital de Superfície (MDS), no qual se representa qualquer objeto acima do solo, ou Modelo Digital de Terreno (MDT), no qual são filtrados os objetos acima do terreno. Tais considerações matemáticas e a topografia do terreno da barragem e do vale de jusante são os parâmetros de entrada das simulações de *Dam Break*, cuja acurácia dos resultados depende da representação das condições reais da barragem a ser simulada. Uma topografia com boa resolução pode não implicar diretamente em um resultado aceitável, visto que este depende de outros fatores como a acurácia do levantamento topográfico (não somente sua resolução) combinados com os parâmetros das condições de contorno do modelo hidrodinâmico.

Atinente à geometria do modelo, especialmente, os levantamentos topográficos de campo dos empreendimentos podem resultar em investimentos consideráveis, tão maiores quanto melhor detalhados, o que corresponderia a um aspecto limitante. Já a utilização de dados topográficos abertos poderia viabilizar a elaboração destes estudos.

Segundo a *Open Knowledge Foundation – OKFN*, dados são abertos quando qualquer pessoa pode acessar, usar, modificar e compartilhar livremente para qualquer finalidade (sujeito, apenas, a requisitos que preservem a proveniência e a sua abertura). Quando os dados são produzidos, coletados ou custodiados por autoridades públicas e disponibilizados em formato aberto, diz-se que são dados abertos governamentais. Já segundo a política de Dados Abertos do Poder Executivo Federal instituída por meio do Decreto nº 8.777/2016, de 11 de maio de 2016, os dados abertos são "dados acessíveis ao público, representados em meio digital, estruturados em formato aberto, processáveis por máquina, referenciados na internet e disponibilizados sob licença aberta que permita sua livre utilização, consumo ou cruzamento, limitando-se a creditar a autoria ou a fonte".

Especificamente, em Mato Grosso não há a disponibilidade de dados abertos governamentais, de outra forma, dados de mapeamento do território elaborados localmente, tal como ocorre em Pernambuco, por exemplo, onde o governo do estado disponibilizou os dados de mapeamento do território feito por varredura a laser conforme pode ser encontrado no sítio eletrônico do projeto denominado “Pernambuco tridimensional”. Somente há, para o Mato Grosso, a disponibilização de dados abertos de topografia provenientes de satélites internacionais, os quais se apresentam em resoluções de menor precisão em relação a um estudo feito localmente por varredura a laser. Em contraste a precária disponibilidade de dados geoespaciais abertos mais precisos no território de Mato Grosso, o estado configura como o segundo do país em termos de número de barragens de mineração, ficando atrás somente do estado de Minas Gerais, em consonância com os dados do boletim mensal de março de 2024, elaborado pela Agência Nacional de Mineração (ANM) (ANM,2024).

Este trabalho objetiva, então, identificar por meio de simulações de ruptura hipotética de uma barragem em Mato Grosso, a influência nos resultados dos modelo ruptura quando se varia o parâmetro de entrada realtivo à base topográfica. Para tanto, as demais condições de contorno referentes aos modelos hidrodinâmicos permaneceram constantes para as simulações enquanto que os parâmetros de entrada de base topográfica foram variados entre dados de levantamento de campo e obtidos por meio de dados abertos disponíveis atualmente.

## **2.MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1.Descrição da Área de Estudo**

As simulações tratam de uma área próxima à Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, onde há uma barragem de terra cuja finalidade é de recreação(Figura 1). Esta área foi

propositalmente adotada tendo em vista que a empresa proprietária da barragem cedeu as informações do levantamento topográfico feito *in loco* para que se pudesse utilizar neste estudo em comparação com as demais bases topográficas obtidas por dados abertos.

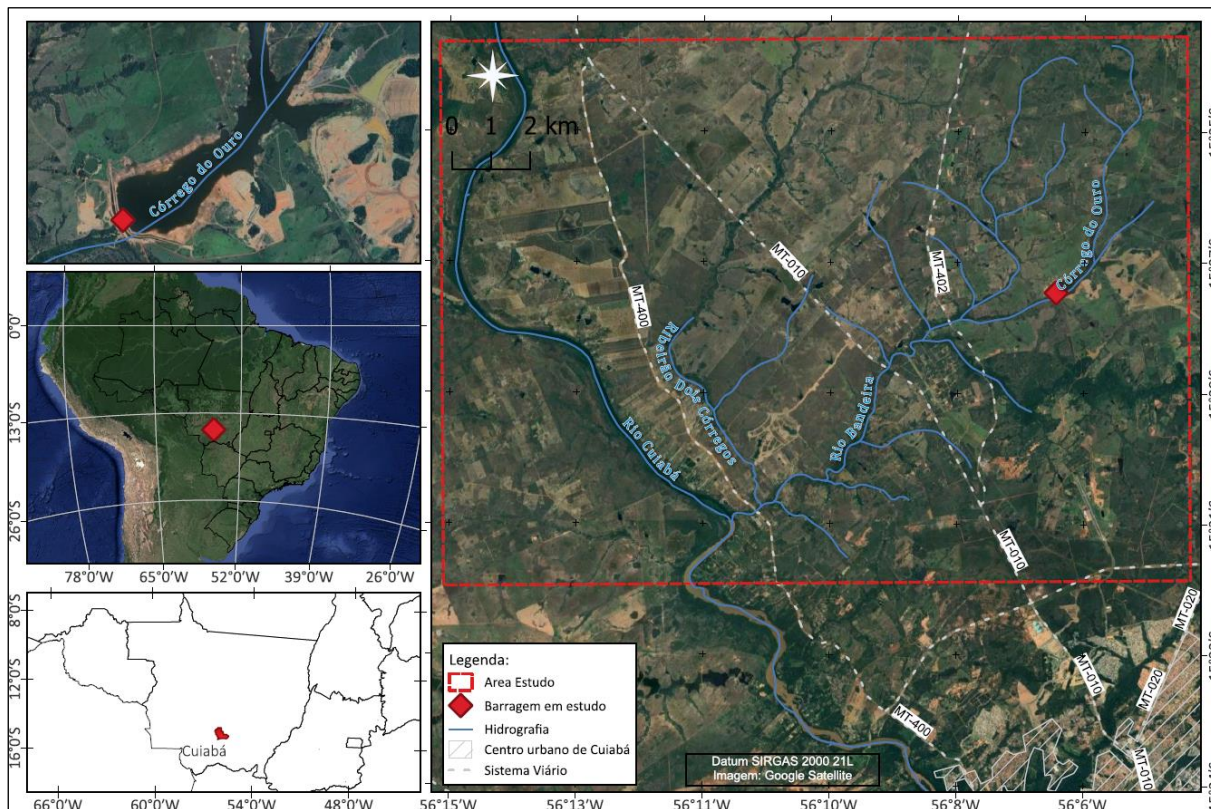


Figura 1 – Localização da região de estudo.

A barragem fará parte do complexo de lazer multieventos denominado “Parque Novo Mato Grosso”, ambos em fase de construção, que conterà esportes aquáticos, pistas de *kart*, autódromos, pistas de caminhada e espaços para shows. O acesso ao parque e barragem se dá por Cuiabá, sentido Chapada dos Guimarães/MT, via MT-251, sendo a entrada de seu acesso localizado a cerca de 11 km da Trincheira Engenheiro Roberto Flávio Abbott de Castro Pinto, entre a Rodovia Helder Cândia e Rodovia Emanuel Pinheiro.

O local de estudo se encontra circunscrito na bacia do Paraguai, delimitada segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), sub-bacia do Alto Paraguai e unidade de Planejamento e Gestão (UPG) P-4 – Alto Rio Cuiabá. A área de drenagem da bacia de contribuição cujo exutório é a crista do barramento é de 16,7 km<sup>2</sup> e a pluviosidade média (mm/ano) corresponde a 1450 mm, segundo o Sistema Integrado de Monitoramento e Licenciamento Ambiental de Mato Grosso da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA,2024). Quanto à hidrografia, a barragem em estudo, barra o córrego do Ouro, afluente do rio Bandeira que por sua vez é afluente do rio Cuiabá. Em termos de pedologia, tem-se a predominância no local de plintossolo pétrico (Embrapa, 2006).

O vale de jusante, quanto à geomorfologia, caracteriza-se por planícies e cursos hídricos de baixa declividade, ademais predomina no entorno áreas para fins de agropecuária e áreas densamente vegetadas apenas nas margens ao longo do eixo dos cursos hídricos córrego do Ouro, rio Bandeira e rio Cuiabá, correspondentes às áreas de preservação permanente (APP). Há três pontes e rodovias, sendo a primeira ponte cruzando o córrego do Ouro a cerca de 3 km do eixo da barragem na rodovia estadual MT-402, a segunda ponte cruzando o rio Bandeira a cerca de 5 km do eixo da barragem na MT-010 e a terceira ponte cruzando ainda o rio Bandeira a cerca de 10 km na MT-400. A confluência do rio Bandeira com rio Cuiabá ocorre a cerca de 11 km do eixo do barramento, onde o rio Bandeira, de calha de aproximadamente 15 metros, desagua no rio Cuiabá com calha 10 vezes maior, de aproximadamente 150 metros de largura. Há, ainda, dentre as benfeitorias na planície de jusante da barragem, diversas chácaras e estâncias, um haras e dois loteamentos rurais residenciais.

Consoante ao memorial descritivo do projeto da barragem, tem-se que o maciço é composto de seção homogênea, com talude de montante com inclinação de 1V:2,2H e de jusante 1V:2H, com uma berma na elevação 189 metros, de largura de 4 metros. O comprimento total do barramento, incluindo suas estruturas é de 820,00 metros e altura máxima é de 21 metros, na região central. A barragem é dotada de filtro vertical, com espessura de 0,40 metros, e filtro horizontal, com espessura de 0,50 metros e uma proteção de ondas no espaldar de montante próximo à crista. O sistema extravasor principal é composto de sete bueiros com diâmetro interno de 1 metro e geratriz inferior na elevação 197 metros, localizado na ombreira direita. Há ainda um extravasor complementar tipo torre de tomada d'água com câmara vertical quadrada de lado 1,40 m e galeria horizontal circular com diâmetro interno de 1,00 m, posicionada, em sua maior parte, sob a barragem, com comprimento total aproximado igual a 50,0 m. A altura do monge é de aproximadamente 7,00 m relativo NA normal, cuja elevação corresponde à 197,00 m. Nesta condição, o nível normal apresenta área de 1,20 km<sup>2</sup> e volume de 6,66 hm<sup>3</sup>(RECEDIVE,2022).

## **2.2.Modelagem**

### **2.2.1. Bases Topográficas**

A fim de que as diferentes simulações propostas neste trabalho fossem comparadas, foram utilizadas, para as mesmas condições de contorno do modelo hidrodinâmico, três bases topográficas distintas, dentre as quais uma delas é proveniente do levantamento em campo feito

basicamente por veículo aéreo não tripulado (VANT) do tipo *drone* e *GPS* geodésico e as demais obtidas por dados abertos.

Segundo o laudo técnico do levantamento topográfico da área da barragem, realizado pelo técnico de agrimensura Maksuel Figueiredo, os trabalhos de campo foram realizado com emprego de GPS Geodésico - marca Topcon, modelo Hiper V, frequência L1/L2 RTK - e Drone modelo DJI M3E PPK. Para o transporte de coordenadas foi utilizado o mesmo GPS Geodésico. Foi utilizado como base o vértice transportado, obtidos a partir do serviço disponibilizado pelo IBGE – Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), e se encontram representadas no Sistema UTM, referenciadas ao Meridiano Central 57° WGR, altitudes ortométricas, tendo como S.G.R (Sistema Geodésico de Referência) o SIRGAS 2000. Alguns pontos de controle como pontes cadastradas a jusante e batimetria nestes locais, foram efetuados também com GPS geodésico de mesma especificação já referida. A planialtimetria da barragem foi feita em novembro de 2023 e resultou em um levantamento com curvas de nível de 1 em 1 metro em um trecho do início do reservatório até jusante, ao longo de aproximadamente 11 km do córrego do Ouro até o rio Cuiabá (FIGUEIREDO, 2023). Estas curvas foram posteriormente transformadas em um MDT, que para fins de simplificação será denominado neste artigo simplesmente por DRONE.

As demais bases topográficas utilizadas nas simulações foram FABDEM (Hawker et al., 2022) e NASADEM (NASA,2000), a primeira se trata de um modelo digital de terreno no qual foram removidas, utilizando-se técnicas de *machine learning*, as distorções de altura de edifícios e árvores do modelo digital global de elevação Copernicus GLO 30, de resolução de 30 metros, enquanto que a segunda se trata de um modelo digital global de elevação (DEM) derivado de uma combinação de melhorias de processamento da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), tais como preenchimento de vazios e fusão com dados indisponíveis no momento da produção original do SRTM, cuja resolução é de 30 metros. A seguir, na Figura 2, o comparativo entre as bases topográficas utilizadas neste artigo.



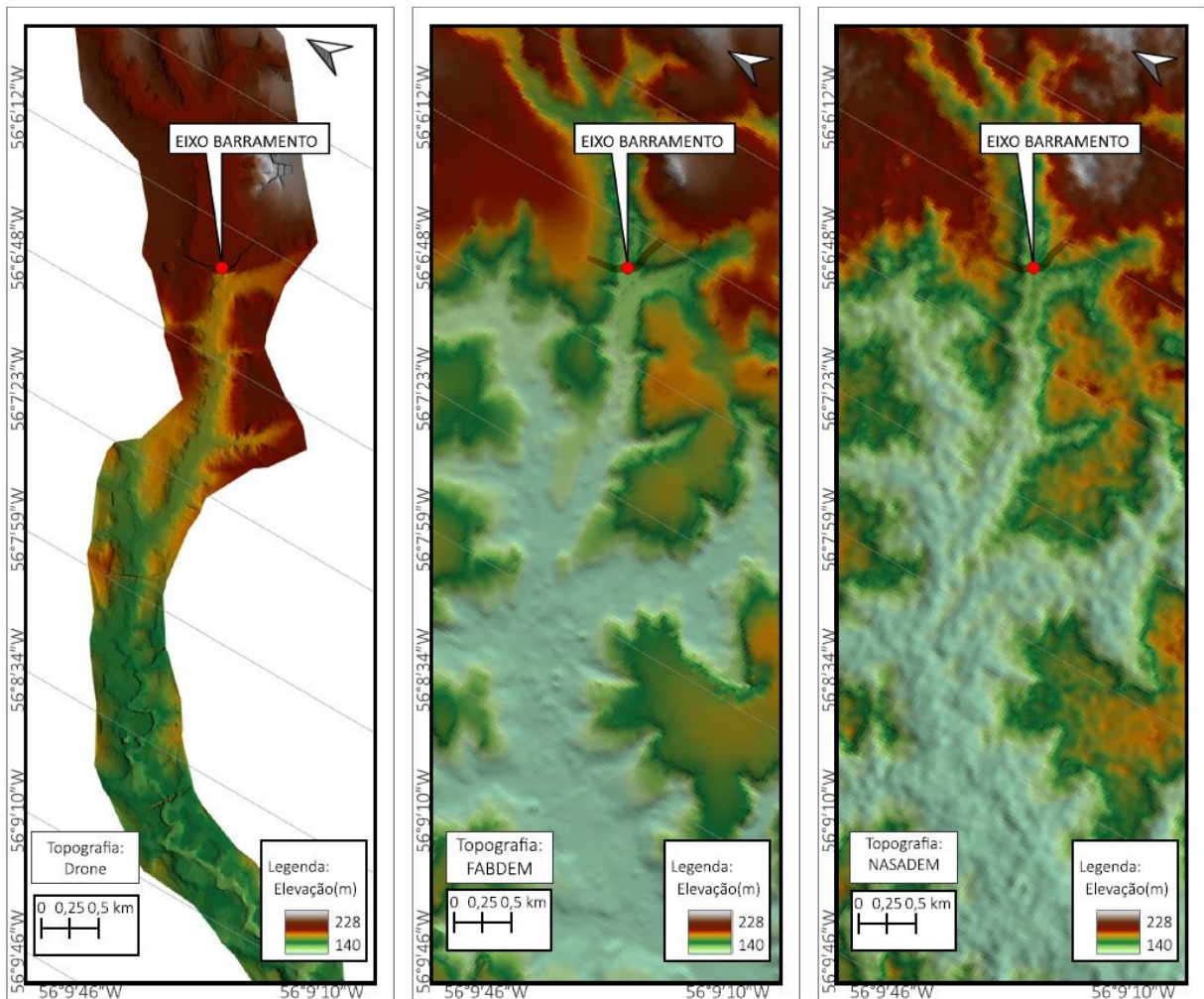


Figura 2 – Bases topográficas em estudo.

A base FABDEM se origina de dados do programa de observação da Terra da União Européia (*The Copernicus Data Space Ecosystem*), cujas informações são provenientes do satélite artificial denominado Copernicus Sentinel, sendo o processamento de retirada de distorções tendo sido publicado como um trabalho de autores da Universidade de Bristol, na Inglaterra. A base NASADEM por outro lado foi feita a partir de melhorias no processamento e resolução elaboradas pela própria Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço Estadunidense (NASA) e nos quais os dados topográficos se originaram da missão SRTM elaborada pela própria NASA, na qual foram captados dados de radar a bordo da nave espacial *Endeavour*, a partir de várias órbitas diárias feitas na Terra (NASA,2024).

### 2.2.2. Parâmetros e Condições de Contorno das Simulações

As modelagens de ruptura foram simuladas utilizando o *software HEC-RAS* (versão 6.4.1), *software* livre elaborado pelo *Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE)*, no seu módulo bidimensional (performando as equações completas de Saint-Venant

nas duas dimensões) com abordagem de análise hidráulica para escoamento variável.

Esta modelagem se trata de um modelo numérico, protótipo da situação real, que se baseia nas equações básicas de conservação de energia, massa e momentum. Para que o modelo represente mais fidedignamente o real, o software exige que sejam atribuídas as seguintes condições de contorno:

- Parâmetros iniciais hidrológicos;
- Dados geométricos do local de estudo (MDE) e inclinação do curso hídrico;
- Coeficientes de *Manning*;
- Estruturas hidráulicas, caso existentes, informações de condições limite e outras condições pertinentes;
- Calibração da malha computacional e informações sobre os intervalos de cálculo computacional;
- Adoção da modelagem de escoamento;
- Definição dos parâmetros do reservatório e de brecha.

A complexidade do estudo dos escoamentos de fluídos torna difícil a resolução desses modelos de forma analítica, sendo interessante que se utilize de métodos computacionais de dinâmica de fluidos, como se propõe o *HEC-RAS*. Este programa atua na análise do movimento do fluído descrevendo seu padrão por meio de regiões finitas.

Quanto ao tipo da modelagem, há a abordagem 1D e 2D, no qual a primeira se despreza a componente velocidade na direção transversal ao escoamento e considera a velocidade uniforme no plano vertical, já a segunda leva em conta as forças que atuam nas direções x e y resultando em informações mais precisas de velocidade, momento e direção do fluxo, principalmente se há fluxo passando por estradas, diques, barreiras e estruturas.

Segundo o Guia de aplicação do *HEC-RAS* para modelos 1D versus 2D (Brunner et al., 2020), se o caminho do fluxo da água é geralmente conhecido para toda a gama de eventos do modelo, a abordagem de modelagem 1D deve ser utilizada, contudo, se a trajetória do fluxo da água for desconhecida para alguns dos eventos a serem modelados, ou se o fluxo pode se dividir e seguir em várias direções, então o modelo 2D será uma abordagem mais apropriada. Ainda, segundo o mesmo autor o mapeamento da área inundada, bem como das velocidades e riscos de inundação (profundidade x velocidade) é mais preciso nos modelos bidimensionais.

Já que a área de jusante da barragem em estudo é composta por uma planície, não se tratando de um vale encaixado, e que há variações significativas do caminho do fluxo ao longo do modelo, e que além disso, o MDT disponibilizado pela empresa proprietária da barragem



representa somente o topo do curso hídrico de forma que não há informações batimétricas ao longo do curso hídrico a jusante, foi adotado o tipo de modelagem bidimensional neste artigo.

A elaboração do modelo 2D em estudo foi feito com malhas de tamanho variável, com refinamento e diminuição de tamanho da célula ao longo do canal principal do curso hídrico em estudo, além disso as células foram alinhadas ao fluxo(Figura 3 à esquerda).

Outra calibração ainda foi necessária nos fluxos através das pontes a jusante da barragem, onde o software exige que sejam atribuídos ao modelo, tendo em vista resultados mais precisos, um elemento de conexão que permita que se utilize os métodos hidráulicos do módulo 1D do programa dentro da abordagem bidimensional (Figura 3 à direita). Para tanto, foram seguidas as seguintes etapas:

- Marcação do eixo central da estrutura de ponte usando um elemento de conexão no programa;
- Calibração da malha local, alinhando a células no sentido do fluxo e refinando seus tamanhos;
- Inserção de dados da ponte e do local como sua geometria, seções transversais, valores de *Manning*;
- Pré-processamento da geometria para criar as curvas da ponte.

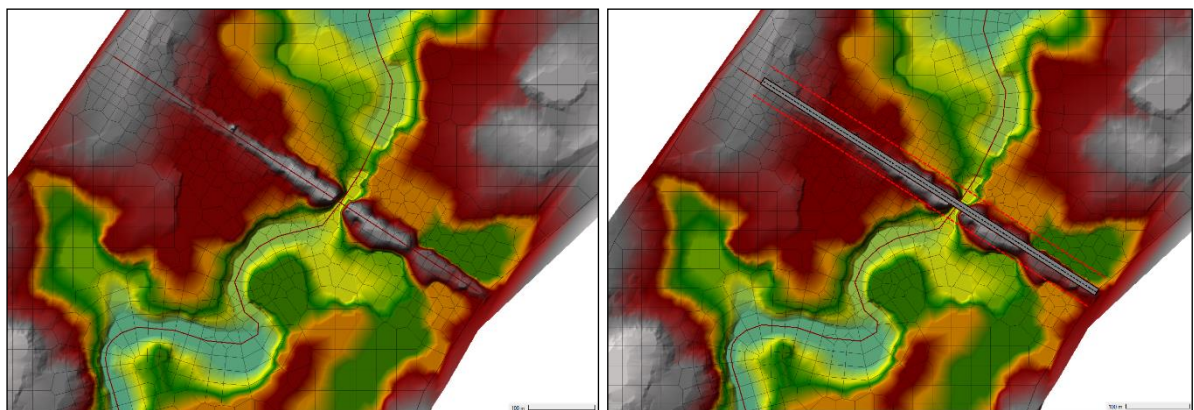


Figura 3 – Exemplo de alinhamento das células na calha do curso hídrico e nos taludes da ponte existente a jusante além do refinamento das células nestes locais(à esquerda) e inserção do elemento de ponte no modelo (à direita) Fonte: Próprio autor

Ainda concernente às condições de contorno, de forma a simplificar o estudo, cujo foco se trata da comparação entre diferentes bases topográficas, ao invés de parametrizar o reservatório e a brecha para que o programa fornecesse o hidrograma de ruptura, foram fornecidos ao programa como condição de montante o hidrograma de ruptura obtido a partir da metodologia de Froehlich (1995), no qual o estudo correlaciona equações de previsão de vazão de pico do hidrograma de ruptura com dados de volume do reservatório e altura de água na

elevação final da brecha de uma barragem de terra, conforme Equação 1.

$$Q_p = 0,607 \times V_w^{0,295} \times H_w^{1,24}$$

Equação 1

Sendo

$Q_p$  = Vazão de pico do hidrograma ( $m^3/s$ );

$V_w$  = volume do reservatório no momento da falha ( $m^3$ );

$H_w$  = altura de água no reservatório no momento da falha acima da elevação final da brecha (m)

A partir desta metodologia foram atribuídos os valores de vazão de pico para um hidrograma triangular simplificado calculado para o volume de reservatório de 3.800 hm<sup>3</sup>, correspondente à altura de água acima da elevação final da brecha de 16 metros. Quanto à altura do triângulo no hidrograma, o tempo de pico foi adotado como 15 minutos e o tempo de base como 1h 30min – tempo total da ruptura da brecha e esvaziamento do reservatório – pois foi adotado o valor médio da recomendação trazidas no Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE (ANA, 2016), no qual para a barragens de terra ou enrocamento foi orientada a utilização do tempo de ruptura total da brecha entre 30 min e 3 horas.

A vazão de pico do hidrograma resultou em aproximadamente 1.694,00 m<sup>3</sup>/s (Gráfico 1), ademais foi mantida uma vazão de base para a bacia, a qual correspondeu a vazão de projeto elaborada pelo empreendedor da barragem ( $Q_{projeto} = 44.6 \text{ m}^3/s$ ) equivalente a um tempo de recorrência de 1.000 anos (RECEDIVE, 2022).

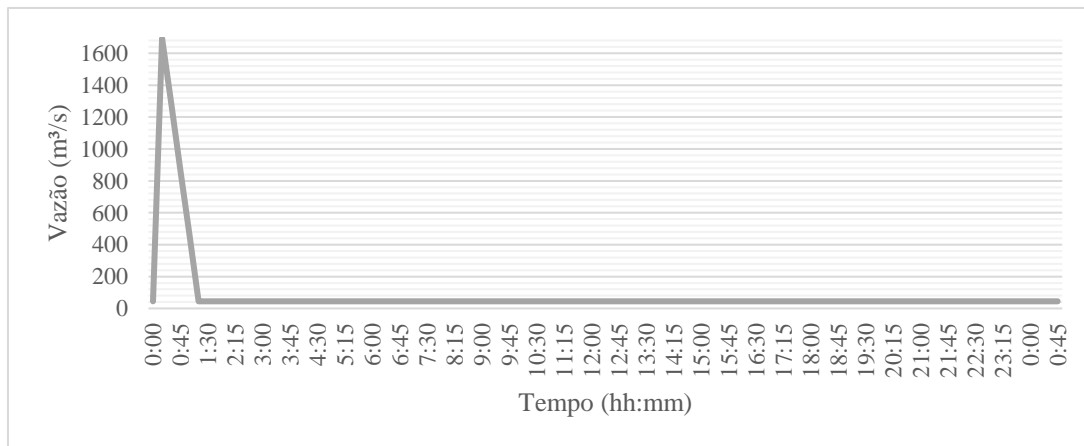


Gráfico 1: Hidrograma de entrada.

Estes dados foram replicados para as diferentes bases topográficas em estudo assim como a condição de contorno de jusante, adotada como a declividade média do curso hídrico de  $i = 0,2\%$  (associada à ocorrência do regime uniforme) e onde a área da malha foi limitada à confluência com o rio Cuiabá.

Um outro parâmetros de entrada no modelo hidrodinâmico se refere ao coeficiente de *Manning* da planície de jusante. Já que o intuito deste artigo é o de estudar especificamente os efeitos de diferentes bases topográficas nos resultados de *Dambreak*, este coeficiente foi mantido fixo pelo valor padrão trazido no programa,  $n=0,06$ , o que corresponde a canais naturais de arroios e rios com margens espaiadas em boas condições e com pouca vegetação (Porto, 2006), similar ao predominantemente observado no local de estudo. Este parâmetro foi adotado uniformemente em toda área de simulação para as três topografias analisadas.

Finalmente, quanto aos tempos computacionais, foi utilizado o intervalo de tempo ajustado conforme o número de Courant. Foi solicitado ao programa que fosse adotado o Courant mínimo de 0,1 e máximo de 1, utilizando intervalos de tempo computacionais de 0,25 segundos e 16 segundos. Os erros volumétricos resultantes das modelagens foram de 0,28% para a base topográfica DRONE, 0,05% para base NASADEM e 0,004% para FABDEM.

### **3.RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1.Simulação com Base Topográfica: Drone**

Esta base topográfica trouxe detalhamentos importantes para o estudo do comportamento do fluxo como os elementos de pontes, seus encontros, o talude correspondente das rodovias, além da batimetria detalhada nos cursos hídricos onde existiam pontes, ainda, houve a limpeza e retirada da vegetação das margens do canal hídrico e demais pontos resultando em um MDT com resolução de 1 metro e malha final com total de 11.624 células. Nessas condições foi possível utilizar a modelagem 2D porém com elementos de pontes de forma que foi possível detalhar com maior acurácia do que as demais bases topográficas os padrões do fluxo passante antes, depois e através das pontes. Observa-se que a direção do fluxo horizontal é calculada com base nos detalhes do terreno e na malha computacional e padrões de circulação horizontal (redemoinhos) podem ser determinados (Figura 4).

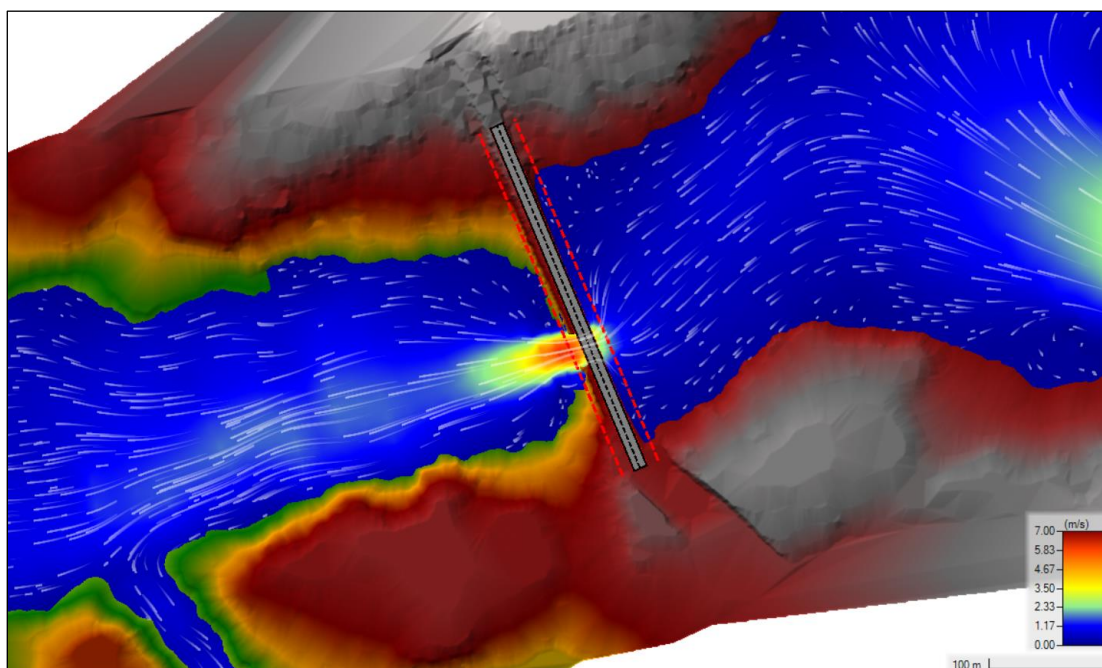


Figura 4 – Representação das velocidades no fluxo através da ponte MT-402 com base topográfica proveniente do DRONE e GPS. Fonte: Próprio autor

Foram observadas limitações espaciais no resultado da envoltória máxima da mancha de inundação, dado que a delimitação da base topográfica disponibilizada foi insuficiente para descrever o fenômeno, ou seja, a mancha se espalharia mais nas direções radiais o que não foi possível representar no modelo devido a largura do estudo topográfico ter sido inferior ao necessário para esta modelagem. Conforme ilustrado na Figura 6, houve 15 locais onde a envoltória máxima de alagamento teve limitação em função da base topográfica.

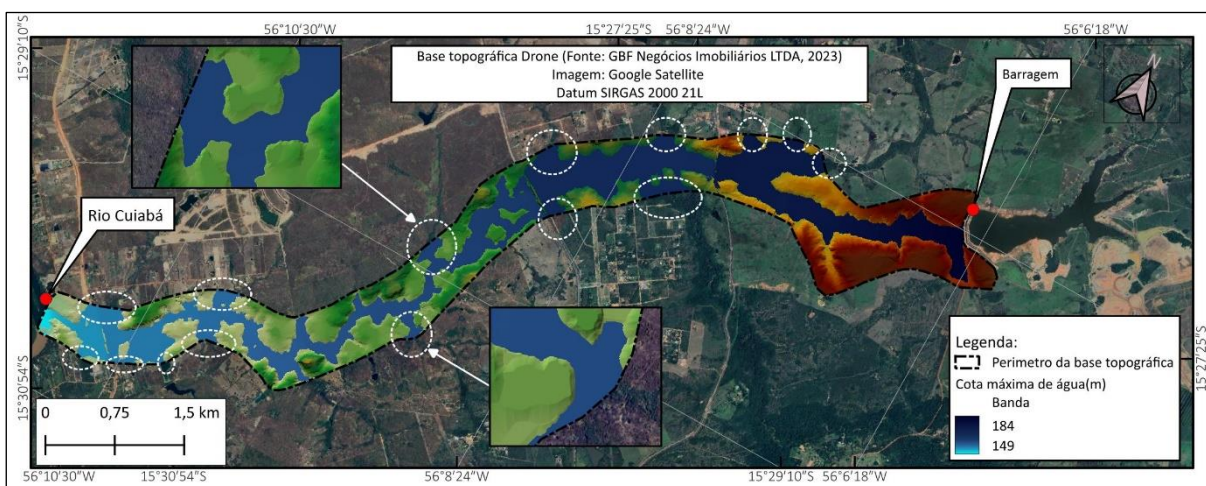


Figura 5 – Limitações espaciais na mancha de inundação na base topográfica proveniente do DRONE e GPS. Fonte: Próprio autor

### 3.2.Simulação com Base Topográfica: NASADEM

Esta base topográfica se diferenciou das demais sobretudo nos locais onde existiam aterros e pontes, onde foi constatado que a vegetação ciliar do curso hídrico era predominante no MDE causando maiores cotas neste local (Figura 4) em relação às demais bases. Neste caso, o modelo foi rodado com refinamentos somente no sentido do fluxo sem se adotar o refinamento nos locais de ponte e taludes, contudo foi possível traçar uma delimitação maior da malha visto que há dados disponíveis para todo o globo terrestre sendo o recorte do MDE definido pelo próprio usuário. Deste modo a malha final resultou em 30.637 células.

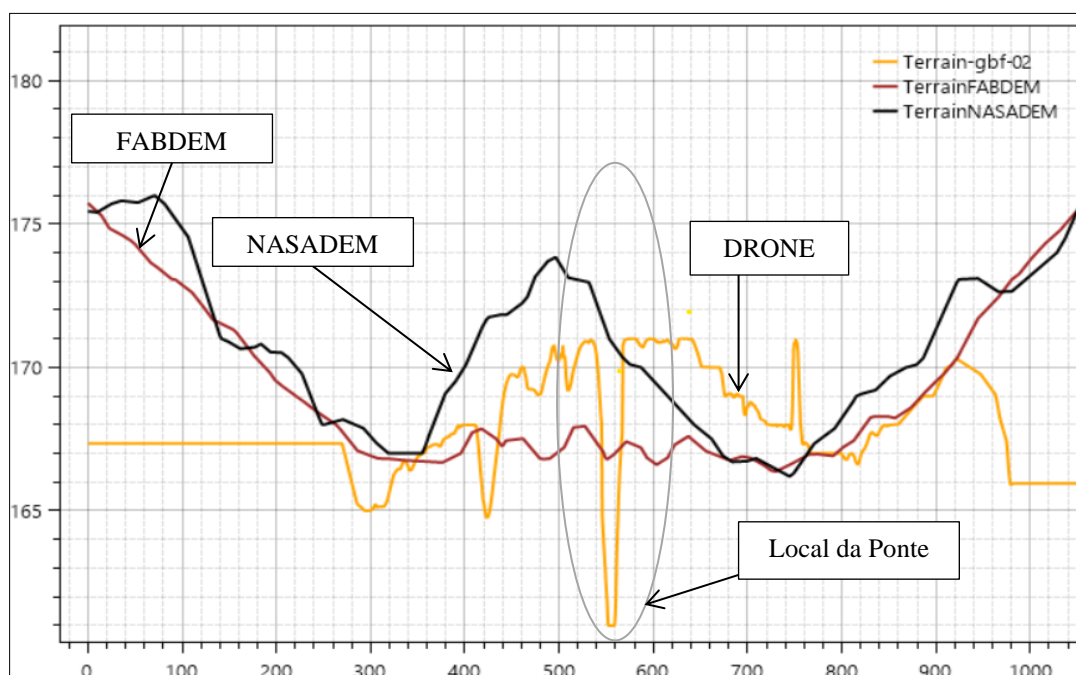


Figura 6 – Representação de um gráfico demonstrando a seção transversal próxima à ponte MT-010 e as diferentes bases topográficas, onde as abcissas correspondem às estacas (m) da seção e as ordenadas às elevações do terreno (m). Fonte: Próprio autor.

### 3.3.Simulação com Base Topográfica: FABDEM

A base topográfica proveniente do FABDEM apresentou, assim como a NASADEM menos detalhamentos que a base topográfica feita em campo, especialmente nos locais onde existiam pontes (Figura 4), porém as cotas observadas, de maneira geral, estavam mais próximas à base disponibilizada pelo levantamento de campo. Neste caso, o modelo foi ajustado com refinamentos somente no sentido do fluxo sem ser adotado o elemento ou refinamento no local de ponte, já que foi preferível rodar o modelo com os dados brutos desta base e também foi possível delimitar uma malha maior em relação ao da base topográfica feita por DRONE, assim como para o estudo com NASADEM. A malha resultou em 41.108 células.



### 3.4.Comparações

Depreende-se da Figura 7, a qual representa o perfil do eixo principal do curso hídrico das bases em estudo e cujo traçado foi disponibilizado no levantamento topográfico feito em campo, que entre as bases obtidas por dados abertos, a FABDEM foi a que mais se aproximou em termos de cotas do terreno com relação ao levantamento feito por DRONE. Em termos de declividade média do curso principal, tem-se para a base correspondente ao DRONE o valor de 0,22%, 0,23% para FABDEM e 0,20% para NASADEM, sendo as amplitudes de cotas dos terrenos correspondentes a 30 metros, 29,8 metros e 31 metros, respectivamente.

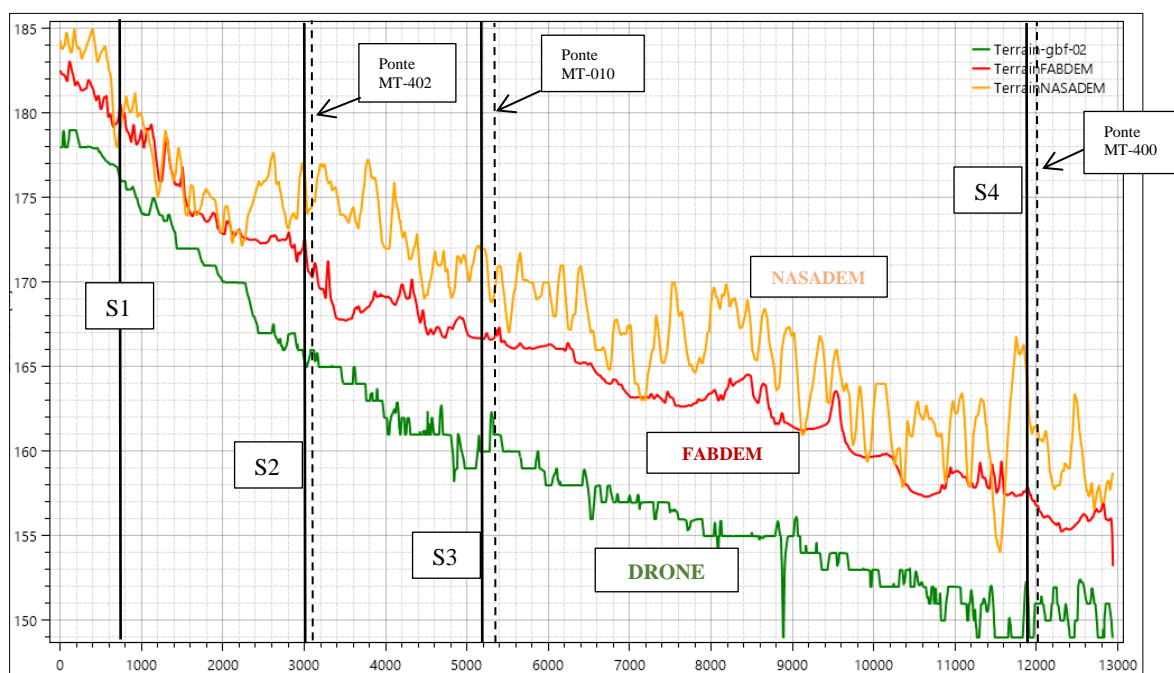


Figura 7 – Representação do eixo do curso hídrico principal para cada base topográfica, onde as abscissas correspondem às estacas (m) e as ordenadas às elevações (m). Fonte: Próprio autor.

Com relação a envoltória máxima de inundação (Figura 8), tem-se para os primeiros metros de inundação certa convergência entre as envoltórias sendo observado um relevo mais encaixado. As envoltórias se diferenciaram mais significativamente após a rodovia e ponte da MT-402 e nas demais pontes, onde atinente aos resultados do estudo da base feita por levantamento topográfico em campo, houve o amortecimento do hidrograma em razão dos obstáculos ao fluxo trazidos pelos elementos de ponte e aterros da rodovia bem descritos nesta base topográfica. Ainda, na mesma base, houve galgamento nos aterros das três pontes, o que foi possível observar pela inserção dos elementos de ponte (1D) no modelo, visto que o programa calcula, nestes casos, o fluxo se comportando como passante por um vertedouro cujo coeficiente de descarga foi adotado como 1,66, diferente do que ocorreria se fosse trabalhado somente com o módulo 2D do programa que não seria capaz de descrever corretamente o



galgamento (HAZELTON,2024).

A maior área de alagamento ocorreu para as base topográficas de dados abertos e menos precisas, FABDEM em seguida da NASADEM, conforme Tabela 1. Foi também comparada a área de interseção entre a envoltória máxima resultante da modelagem utilizando a base topográfica de levantamento de campo, a qual teve a limitação lateral em seu levantamento, e as demais bases utilizadas provenientes de dados abertos. Houve uma interseção maior entre a mancha de alagamento proveniente da base FABDEM do que NASADEM se comparadas com a área proveniente da base DRONE, indicando uma maior correlação entre elas, ainda que a área da mancha proveniente da base NASADEM tenha resultado em uma área máxima alagada de 6.16 km<sup>2</sup> ,mais proxima portanto, da base DRONE (3,59 km<sup>2</sup>) do que FABDEM, a qual resultou em uma área cerca de 3 vezes maior.

Base Topográfica	Área máx. alagada (km <sup>2</sup> )	Interseção com área de base DRONE (km <sup>2</sup> )	Área da interseção / área base DRONE (%)
DRONE	3.59	3.59	100%
FABDEM	10.5	3.53	98%
NASADEM	6.16	2.77	77%

Tabela 1: Área de envoltória de inundação e interseções entre as áreas de dados abertos e de levantamento de campo.

A mancha proveniente do levantamento topográfico in loco apresentou uma conformação mais encaixada em alguns locais onde se limitou à calha do curso hídrico principal e regiões próximas enquanto que para as demais bases houve um maior espriamento devido as maiores larguras de base das seções topográficas.

Pode-se observar uma maior semelhança na envoltória final das manchas das bases FABDEM e NASADEM em termos de área de alagamento, o que também foi concluído estudo conduzido por Ferla et al. (2022), no qual foram estudadas diferentes bases topográficas no estudo de ruptura da barragem João Amado (RS).

Para fins de comparação foram traçadas quatro seções transversais na planície de jusante denominadas S1, S2, S3 e S4 (Figura 8), distantes do eixo do barramento em 515 m, 2.836 m, 4.556 m e 10.397 m, respectivamente. As seções foram escolhidas pela proximidade aos elementos de pontes em busca de que se pudesse observar com maior detalhe as mudanças no fluxo naqueles locais. As representações do terreno e do nível d’água destas seções transversais se encontram ilustrados no Apêndice deste artigo.

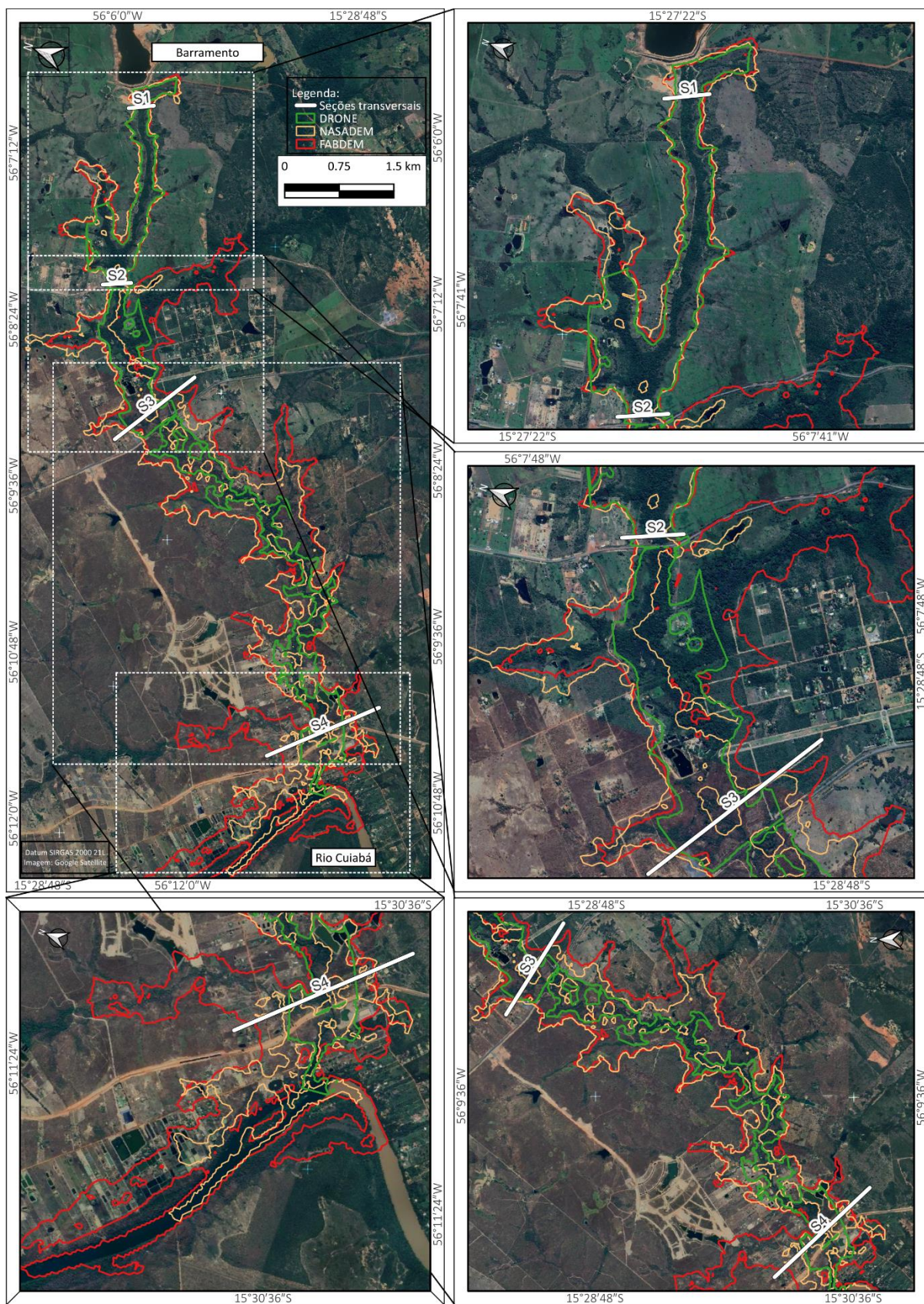


Figura 8 – Envoltórias máximas de inundação em referência às diferentes bases topográficas. Fonte: Próprio autor.

Depreende-se da Figura 9, quanto à altura máxima do nível d'água atingido nas seções



transversais traçadas, que na parte inicial há certa semelhança entre as bases topográficas, porém a diferença se acentua à medida que o fluxo se distancia do eixo do barramento. Há semelhança para as seções S2, S3 e S4 quanto às bases NASADEM e FABDEM, porém a modelagem com a base topográfica feita por levantamento de campo se diferencia das demais principalmente nas seções S2, S3 e S4, que se localizam próximas às rodovias e pontes, que se encontram mais bem detalhadas na planialtimetria.

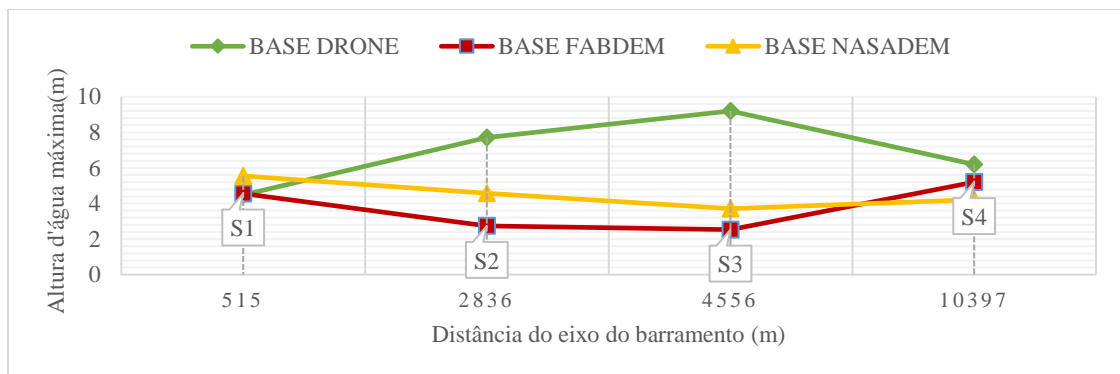


Figura 9: Altura máxima do nível d'água nas seções transversais e para cada base topográfica.

Quanto à vazão máxima atingida nas seções, tem-se conforme Figura 10, semelhança entre as bases topográficas para a seção S1, porém, observa-se um abatimento da ordem de 80% para a base topográfica feita por DRONE, muito embora tenha ocorrido uma amplitude de abatimento maior para a base topográfica NASADEM, seguida da base DRONE e por fim FABDEM.

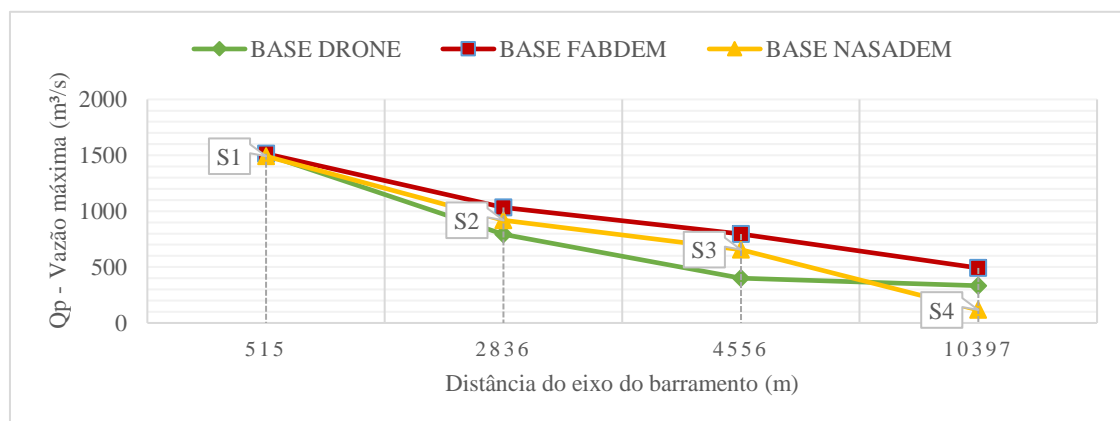


Figura 10: Vazão de pico atingida nas seções transversais e para cada base topográfica.

Quanto ao tempo de pico, observa-se que os modelos se assemelharam muito nas seções S1, S2 e S3, tendo se diferenciado mais na seção S4, na qual o resultado com base NASADEM foi maior que os demais.

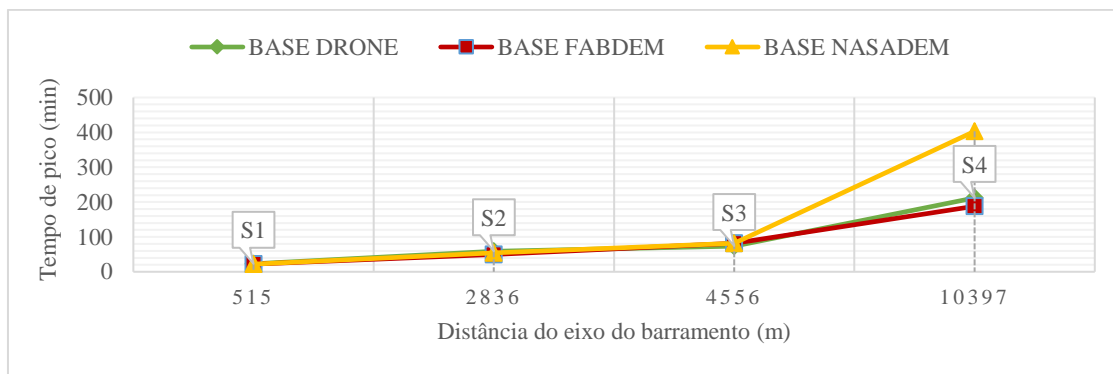


Figura 11: Tempo de pico atingida nas seções transversais e para cada base topográfica.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foram comparadas três bases topográficas distintas para condições de contorno e dados de entrada semelhantes no *software* HEC-RAS, módulo bidimensional. Dentre as comparações foram observados os parâmetros de área de alagamento e comportamento da onda de inundação, além de características de vazão máxima, tempo de pico e altura d'água máxima nas seções transversais de interesse.

Depreende-se, portanto, do que foi estudado:

- As manchas provenientes das bases topográficas FABDEM e NASADEM resultaram em maiores áreas alagadas;
- Embora tenham resultado em maiores áreas alagadas, as bases topográficas provenientes de dados livres resultaram, nas seções transversais investigadas, em menores níveis d'água com relação à base topográfica feita por DRONE em levantamento de campo;
- Os resultados provenientes das bases topográficas FABDEM e NASADEM resultaram em delimitações de manchas mais semelhantes em termos de área, enquanto que o da base topográfica feita por DRONE em levantamento de campo se diferenciou, sobretudo entre as seções S2 e S3, entre as rodovias e pontes MT-010 e MT-400;
- A base topográfica FABDEM se aproximou mais dos resultados da base proveniente do levantamento de campo no que diz respeito à interseção da área de alagamento entre as manchas. Além disso, resultou em uma maior área de alagamento tendendo a um cenário mais seguro, porém, a base NASADEM se aproximou mais dos resultados do levantamento de campo no que se refere às vazões de pico e níveis d'água.
- Os resultados sugerem que para a definição da área inundada da barragem, para

fins de classificação de seu Dano Potencial, é aceitável que se utilize as bases topográficas advindas de dados abertos, já que correspondem a manchas mais conservadoras, porém quanto à elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), o uso destas bases deve ser evitado pois pode subdimensionar a altura máxima atingida nas seções notáveis assim como o risco hidrodinâmico.

## 5.REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Report Mensal de Barragens de mineração, Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/boletim-mensal-marco-2024.pdf>. Acesso em: abril, 2024.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

BRASIL. Decreto Federal nº 8.777, de 11 de maio de 2016. Institui a Política de Dados Abertos do Poder Executivo Federal. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

BRUNNER, Gary; SAVANT, 67; HEATH, R. E. **Modeler application guidance for steady vs unsteady, and 1D vs 2D vs 3D hydraulic modeling**. Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA, 2020.

DE ORIENTAÇÃO, ANA Guia. Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE. Brasília, DF, 2016.

FERLA, Rute et al. **Uso de diferentes topografias na propagação de hidrograma associado à ruptura hipotética de barragem**. In: Congreso Latinoamericano de Hidraulica (30.: 2022:[Foz do Iguaçu]). Anales del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2022: volúmen 5: ingeniería e infraestructuras hidráulicas. Madrid: IAHR, 2023.

FIGUEIREDO, M., **Relatório Técnico do Plano de Ação de Emergência (PAE)** - Lago Recreativo Cuiabá, Mato Grosso, 2023.

FROEHLICH, D. C. Peak outflow from breached embankment dam. **Journal of water Resources Planning and management**, v 121, n.1, p. 90-07, 1995.

HAZELTON, J. **Introdução ao Modelo Hidráulico 2D HEC-RAS: Bridges and 1D/2D Combined Model**. Session 10. Brasília, 2024.

HAWKER, Laurence et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, 2022.

MELO, J. F. “Dam-break flood risk assessment” in Anais do Second International Dam World Conference, Lisboa, Abr. 2015, pp. 47-64.

MINISTÉRIO DA GESTÃO. Dados Abertos. Brasília, 2024. Disponível em: [www.gov.br/governodigital/pt-br/dados-abertos](http://www.gov.br/governodigital/pt-br/dados-abertos). Acesso em: fev. 2024.

NASA. “**NASADEM**: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products”. NASA's Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <https://go.nasa.gov/3wwfHEt>. Acesso em: fev. 2024.

NASA. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm#:~:tex>. Acesso em: fev. 2024.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. rev. EESC-USP São Carlos-SP, 2006.

RECEIVED, L. C., **Memorial Descritivo do Projeto do Lago Recreativo Cuiabá**, Mato Grosso, 2022.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Minas Gerais, 2015.

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS. **Tipos de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p. il. Inclui apêndices.

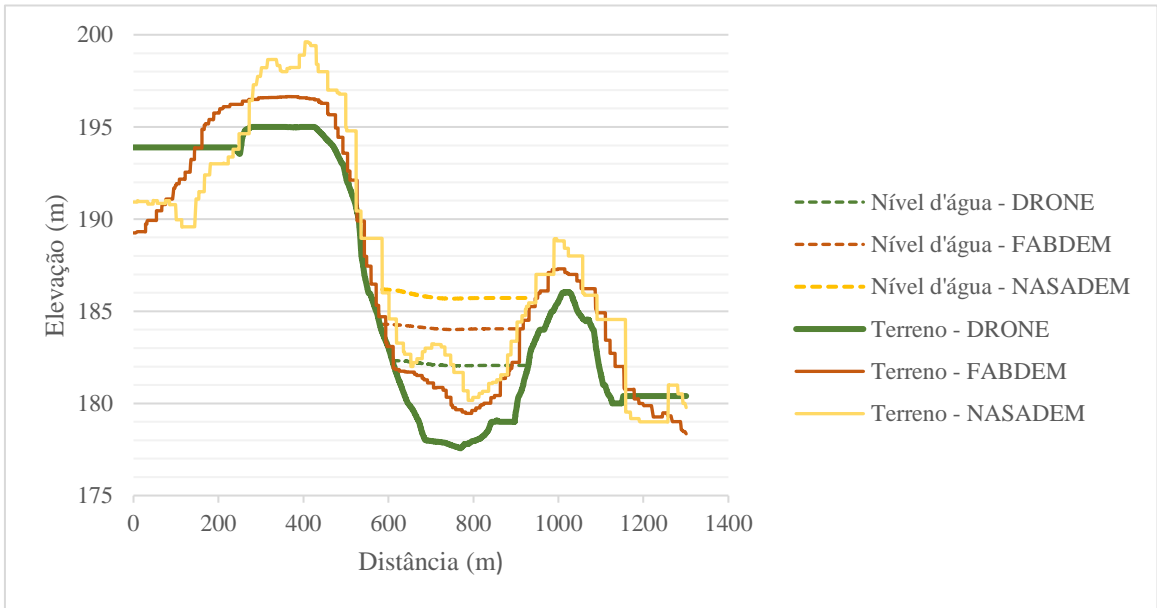
<https://www.gov.br/governodigital/pt-br/dados-abertos>

## **AGRADECIMENTOS**

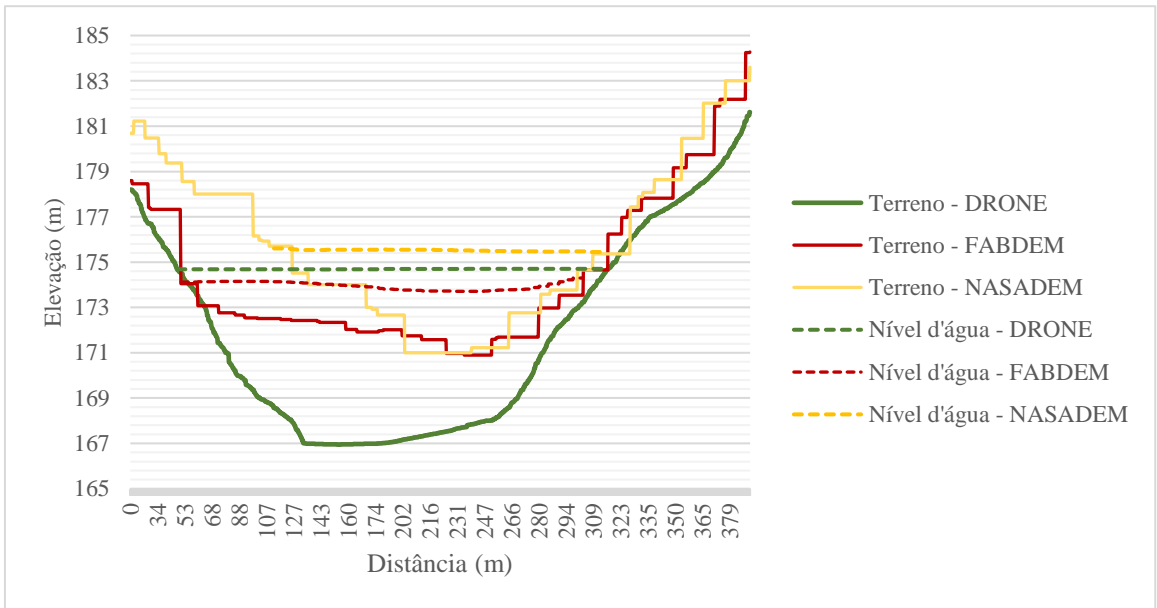
Os autores agradecem à GBF Negócios Imobiliários LTDA por gentilmente ceder os dados do levantamento topográfico da barragem assim como autorizar seu uso e citação neste artigo.



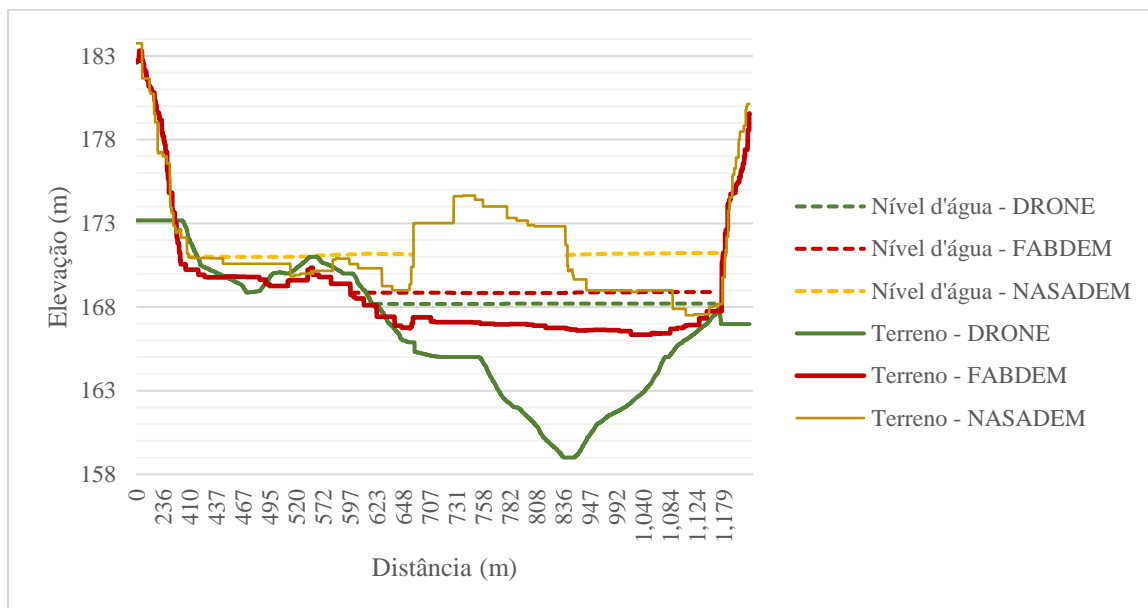
APÊNDICE



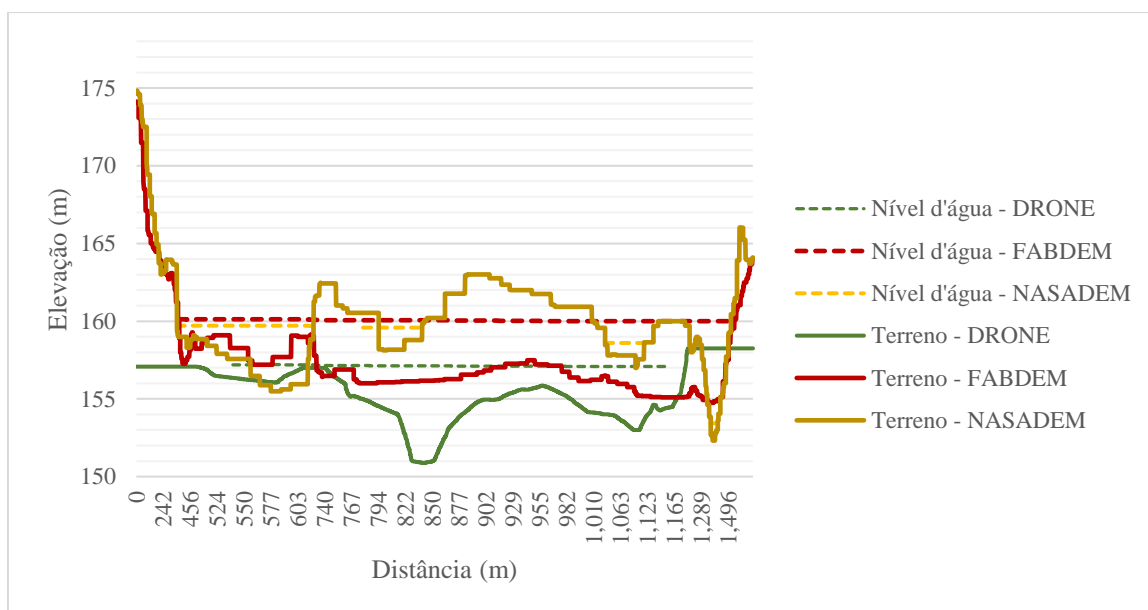
Representação do terreno e nível d'água máximo para a seção transversal S1 e para cada base topográfica estudada.



Representação do terreno e nível d'água máximo para a seção transversal S2 e para cada base topográfica estudada.



Representação do terreno e nível d'água máximo para a seção transversal S3 e para cada base topográfica estudada.



Representação do terreno e nível d'água máximo para a seção transversal S4 e para cada base topográfica estudada.