

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

RODRIGO MARTINS LUCCI

**Desempenho de modelos hidrodinâmicos 1D e 2DH para estimativa de
manchas de inundação e sua relação com a morfologia do vale a jusante de
barragens**

São Paulo
2022 (Edição Original)
2022 (Edição Corrigida)

RODRIGO MARTINS LUCCI

Desempenho de modelos hidrodinâmicos 1D e 2DH para estimativa de manchas de inundação e sua relação com a morfologia do vale a jusante de barragens

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título em Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Jose Rodolfo Scarati Martins

São Paulo
2022 (Edição Original)
2022 (Edição Corrigida)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de outubro de 2022

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo na publicação

Biblioteca

Escola Politécnica

Lucci, Rodrigo Martins

Desempenho de modelos hidrodinâmicos 1D e 2DH para estimativa de manchas de inundação e sua relação com a morfologia do vale a jusante de barragens / Rodrigo Martins Lucci; orientador, José Rodolfo Scarati Martins. São Paulo – versão original – São Paulo, 2022. 112 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1. Modelagem 1D e 2DH 2. Desempenho de modelos hidrodinâmicos 3. Manchas de inundação
I. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II. t.

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a minha esposa Luciana,
meus filhos Mariana e Bento, e aos meus pais Ubaldo e Lucila.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ubaldo e Lucila, minha esposa Luciana e a toda minha família pelo incentivo e apoio para que eu pudesse concluir esta etapa do meu aprendizado.

À minha esposa, meus filhos Mariana e Bento pela paciência e compreensão em todos os momentos em que estive ausente.

Aos engenheiros da minha família que serviram e inspiração para a escolha desta profissão, em especial ao meu avô Ezequiel da Silva Martins pelo grande exemplo inteligência e dedicação à Engenharia.

Ao professor José Rodolfo Scarati Martins, pelos ensinamentos, orientação, incentivo, pela oportunidade e compartilhamento de experiências ao longo de quase duas décadas de trabalhos, e pela paciência.

À amiga professora Liliane Lopes Costa Alves Pinto por me acolher e ensinar na prática a engenharia nos meus primeiros anos de profissão.

Aos colegas da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica por todo apoio e incentivo para a elaboração deste trabalho.

E por fim, agradeço aos Espíritos Luz e principalmente a Deus por permitir que eu alcançasse este aprendizado.

Muito obrigado!

RESUMO

Atualmente o mapeamento de áreas potencialmente inundáveis é exigido como resultados dos estudos hidrológicos e hidráulicos que envolvem eventos de grande magnitude de descargas, como nas estimativas de impactos de rompimento de barragens, avaliações de cheias extremas, diagnósticos de sistemas de drenagem, alterações nos níveis d'água causados por intervenções nos corpos hídricos etc. A geração de manchas de inundação em rios pode ser bem representadas por modelos 1D e 2DH, pois grande parte dos cursos d'água apresentam as duas dimensões horizontais, uma longitudinal e outra transversal ao eixo do rio, mais significativas que a dimensão vertical. Os cursos d'água que apresentam declividade baixa com planícies de inundação planas e extensas dificultam a definição correta do limite das áreas potencialmente inundáveis por meio de modelação matemática. O objetivo desta pesquisa é avaliar o desempenho de modelos hidrodinâmicos 1D e 2DH e relacioná-lo com a morfologia do vale a jusante de barragens, com a caracterização de diferentes trechos de rios em função de suas declividades e planícies laterais, e relacioná-las com os resultados das simulações nos modelos 1D e 2DH para eventos observados para avaliar e comparar seus desempenhos. A categorização da topografia foi realizada para os vales de jusante das barragens de Jurumirim, Paranapanema, Chavantes e Ourinhos, localizada no rio Paranapanema que divide os estados de São Paulo e Paraná. Por meio do estudo morfométrico foi identificado um parâmetro "p" para cada vale, que relaciona área da superfície inundada com a respectiva profundidade. Para as simulações hidrodinâmicas 1D e 2DH foi utilizado o software HEC-RAS, com os dados da cheia de janeiro de 2016. Para o desempenho de cada modelo, os resultados foram comparados com a mancha de inundação obtida com a imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 da Planet Labs 2019. O desempenho dos modelos foi diferente para cada vale de jusante estudado, e foram similares entre os modelos com mínimas diferenças, porém de forma geral o modelo 2DH apresentou maior acerto que o modelo 1D, entre 0,07% e 17,75%. Conclui-se que houve uma tendência do aumento do desempenho do modelo 2DH em relação ao modelo 1D para os vales com maior parâmetro "p" e menor declividade.

Palavras-chave: Modelagem 1D e 2DH. Desempenho e calibração de modelos hidrodinâmicos. Manchas de inundação. Segurança de barragens. Alta densidade de dados observados.

ABSTRACT

Currently, the mapping of potentially floodable areas is required as a result of hydrological and hydraulic studies that involve events of great magnitude of discharges, such as in the estimation of impacts of dam ruptures, assessments of extreme floods, diagnosis of drainage systems, changes in water levels, water caused by interventions in water bodies etc. The generation of flood spots in rivers can be well represented by 1D and 2DH mathematical models, since most watercourses have two horizontal dimensions, one longitudinal and the other transversal to the river axis, more significant than the vertical dimension, with a ratio of kilometers to meters. Watercourses with low slopes with flat and extensive floodplains make it difficult to correctly define the limits of potentially floodable areas through mathematical modeling. The objective of this research is to evaluate the performance of 1D and 2DH hydrodynamic models and to relate it to the morphology of the valley downstream of dams, with the characterization of different river stretches according to their slopes and lateral plains, and to relate them with the simulation results in the 1D and 2DH models for observed events to evaluate and compare their performances. The topography categorization was performed for the downstream valleys of the Jurumirim, Paranapanema, Chavantes and Ourinhos dams, located on the Paranapanema river that divides the states of São Paulo and Paraná. Through the morphometric study, a parameter “p” was identified for each valley, which relates the area of the flooded surface with the respective depth. For the 1D and 2DH hydrodynamic simulations, the HEC-RAS software was used, with the January 2016 flood data. For the performance of each model, the results were compared with the flood spot obtained with the satellite image of January 2016 from Planet Labs 2019. The performance of the models was different for each downstream valley studied, and they were similar between the models with minimal differences, but in general the 2DH model was more accurate than the 1D model. It is concluded that there was a trend towards an increase in the performance of the 2DH model in relation to the 1D model for the valleys with the highest “p” parameter.

Keywords: 1D and 2DH modeling. Performance and calibration of hydrodynamic models. Flood Maps. Dam safety. High density of observed data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características hidrogeométricas de uma seção transversal em um escoamento em canal	7
Figura 2 – Elemento de volume a) escoamento tridimensional e b) escoamento bidimensional	9
Figura 3 – Seção transversal de um rio	10
Figura 4 – Distribuição dos Marcos Geodésicos no Estado de São Paulo – Estações RN em vermelho e Estações SAT em verde.....	13
Figura 5 – Limites das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI.	14
Figura 6 – Manchas de inundação geradas com base em diferentes MDEs: a) MDE com base nas cartas 1:50.000 do IBGE; b) MDE TOPODATA; c) MDE SRTM e d) MDE ASTER.....	15
Figura 7 – Mancha de inundação gerada com a sobreposição de um plano em um MDE.	17
Figura 8 – Etapas do modelo HAND: a) consistência hidrológica; b) determinação da direção de escoamento; c) definição da rede de drenagem e d) normalização do MDE.....	18
Figura 9 – Mancha de inundação gerada pelo CLiv.	20
Figura 10 – Seções transversais com as linhas de borda, e Mancha de inundação com resultado de profundidades – HEC-RAS.....	21
Figura 11 – direcionamento do fluxo em estudos hidráulicos de rios e canais	22
Figura 12 – (a) Imagem de satélite ENVISAT ASAR (75 m de resolução), (b) Imagem de satélite ERS-2 SAR (12,5 m de resolução); (c) cheia observada derivada da combinação dos 10 mapas.....	26

Figura 13 – imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 – trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande	30
Figura 14 – MDT do trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande.....	31
Figura 15 – Usinas hidroelétrica da cascata do rio Paranapanema	32
Figura 16 – Áreas dos vales de jusante	33
Figura 17 – Vale de jusante de Jurumirim	34
Figura 18 – Vale de jusante de Paranapanema	34
Figura 19 – Vale de jusante de Chavantes.....	35
Figura 20 – Vale de jusante de Ourinhos	35
Figura 21 – Perfil dos NAs em relação ao fundo médio para cada profundidade do vale de jusante de Jurumirim.....	36
Figura 22 – Profundidades, áreas inundadas dos vales de jusante e parâmetro “p”.37	
Figura 23 – Relação entre a declividade média do vale e o parâmetro p.....	37
Figura 24 – Hidrograma da cheia observada de 2016 – Trecho JUR-PIR	39
Figura 25 – Hidrograma Excepcional de TR 100 anos - Trecho JUR-PIR	39
Figura 26 – Hidrograma de ruptura hipotética de Jurumirim - Trecho JUR-PIR	40
Figura 27 – Hidrograma da cheia observada de 2016 – Trecho PNP-CHV	40
Figura 28 – Hidrograma Excepcional de TR 100 anos - Trecho PNP-CHV	40
Figura 29 – Hidrograma de ruptura hipotética de Jurumirim - Trecho PNP-CHV	41
Figura 30 – Hidrograma da cheia observada de 2016 – Trecho CHV-OUR-SGD.....	41
Figura 31 – Hidrograma Excepcional de TR 100 anos - Trecho CHV-OUR-SGD.....	41

Figura 32 – Hidrograma de ruptura hipotética de Jurumirim - Trecho CHV-OUR-SGD	42
Figura 33 – Representação da descarga de operação da UHE Piraju	42
Figura 34 – Representação da descarga de operação da UHE Chavantes	42
Figura 35 – Representação da descarga de operação da UHE Ourinhos	43
Figura 36 – Representação da descarga de operação da UHE Salto Grande	43
Figura 37 – Rede de simulação 1D – Trecho JUR-PIR	43
Figura 38 – Rede de simulação 1D – Trecho PNP-CHV	44
Figura 39 – Rede de simulação 1D – Trecho CHV-OUR-SGD	45
Figura 40 – Rede de simulação 2D – Trecho JUR-PIR	45
Figura 41 – Rede de simulação 2D – Trecho PNP-CHV	47
Figura 42 – Rede de simulação 2D – Trecho CHV-OUR-SGD	48
Figura 43 – Calibração dos modelos 1D e 2DH para o trecho JUR-PIR	51
Figura 44 – Calibração dos modelos 1D e 2DH para o trecho PNP-CHV	51
Figura 45 – Calibração dos modelos 1D e 2DH para o trecho CHV-OUR-SGD	52
Figura 46 – Manchas de inundação 1D – JUR-PIR	53
Figura 47 – Manchas de inundação 1D – PNP-CHV	54
Figura 48 – Manchas de inundação 1D – CHV-OUR-SGD	55
Figura 49 – Manchas de inundação 2D – JUR-PIR	56
Figura 50 – Manchas de inundação 2D – PNP-CHV	56
Figura 51 – Manchas de inundação 2D – CHV-OUR-SGD	57

Figura 52 – imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 – trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande	60
Figura 53 – classificação binária terra e água da imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 – trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande	61
Figura 54 – Processo de classificação pixel-a-pixel	62
Figura 55 – Desempenho dos modelos.....	64
Figura 56 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Jurumirim	65
Figura 57 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Paranapanema	66
Figura 58 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Chavantes.....	67
Figura 59 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Ourinhos	68
Figura 60 – Relação entre área, profundidade e o parâmetro morfológico “p”	69
Figura 61 – Vale de jusante da Paranapanema - PNP – visualização tridimensional	69
Figura 62 – Vale de jusante da Jurumirim - JUR – visualização tridimensional	70
Figura 63 – Vale de jusante da Chavantes - CHV – visualização tridimensional	70
Figura 64 – Vale de jusante da Ourinhos - OUR – visualização tridimensional.....	70
Figura 65 – Diferenças os pixels “positivos” entre o modelo 2DH e 1D	71
Figura 66 – Desempenho dos modelos 1D e 2DH em função do parâmetro morfológico “p” para cada vale de jusante	72
Figura 67 – Subdivisão da seção transversal para o cálculo do transporte no HEC-RAS (USACE, 2016a).....	75
Figura 68 – Curvas das razões entre as manchas calculadas-observada e Erro Absoluto Total.....	76

Figura 69 – Resultado do modelo calibrado para a Imagem observada no ponto de calibração convencional	77
Figura 70 – Resultado das calibrações convencional e alternativa na curva de Erro Absoluto Total	78
Figura 71 – Pixels “negativos”, “falsos positivos”, “positivos” e “falsos negativos” em relação a água e terra observadas para os resultados dos métodos de calibração convencional e alternativo	79
Figura 72 – Comparação da seção transversal dos MDT Emplasa + batimetria e TOPODATA: (a) localização da seção transversal a jusante da UHE Chavantes; (b) seções transversais; (c) MDT Emplasa + batimetria; MDT TOPODATA	81
Figura 73 – Comparação do resultado da simulação 1D para o vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016	83
Figura 74 – Comparação do resultado da simulação 2D para o vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016	83
Figura 75 – Malha 2D com células que abrangem a calha e a planície lateral	84
Figura 76 – Comparação entre as seções transversais do modelo 1D e a malha do modelo 2D para o vale de jusante de CHV	85
Figura 77 – Pixels classificados como “água” no vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica	12
Tabela 3-2 – PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica para as UGRHIs nos diferentes MDEs	14
Tabela 4-1 – Características das barragens e dos vales de jusante da cascata do rio Paranapanema	29
Tabela 5-1 – Profundidades, áreas inundadas dos vales de jusante e parâmetro “p”	36
Tabela 5-2 – Parâmetro morfológico p dos vales de jusante.....	37
Tabela 5-3 – Cenários de Simulação Hidrodinâmica	38
Tabela 5-4 – Coeficiente de rugosidade de manning do modelo 1D.....	49
Tabela 5-5 – Coeficiente de rugosidade de manning do modelo 2DH	50
Tabela 5-6 – Comparação do número de pixels de área inundada dos modelos 1D e 2DH para os cenários de cheia TR 100 e ruptura hipotética das barragens	59
Tabela 5-7 – Comparação da área inundada dos modelos 1D e 2DH para os cenários de cheia TR 100 e ruptura hipotética das barragens	59
Tabela 5-8 – Padronização da classificação da mancha de inundação calculada	63
Tabela 7-1 – Padronização da classificação da mancha de inundação calculada	74
Tabela 7-2 – Resultados da comparação das manchas calculadas com a mancha observada	75
Tabela 9-1 – Sugestão de quantidade de cada variável e número de cenários	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Modelo hidrodinâmico unidimensional
2DH	Modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTER GDEM	Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model
CHV	Chavantes
CHV-OUR-SGD	Chavantes- Ourinhos - Salto Grande
CTG	China Three Gorges
DPI	Divisão de Processamento de Imagem
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JUR	Jurumirim
JUR-PIR	Jurumirim- Piraju
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfícies
METI	Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão
NA	Nível d'água
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
OUR	Ourinhos
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PIR	Piraju
PNP	Paranapanema
PNP-CHV	Paranapanema – Chavantes
RAS Mapper	River Analysis System Mapper
SGD	Salto Grande
SIG	Sistema de Informações Georreferenciadas
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciada
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TR	Período de Retorno
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo geral	5
2.2	Objetivos específicos	5
3	REVISÃO DA LITERATURA	6
3.1	Escoamento em canais	6
3.2	Modelos hidrodinâmicos.....	8
3.2.1	Modelos Bidimensionais Horizontais (2DH)	9
3.2.2	Modelos Unidimensionais (1D)	10
3.3	Modelos digitais de terreno e de superfície.....	11
3.4	Modelos de geração de manchas de inundação.....	16
3.5	Estudos com modelos 1D e 2DH	21
3.6	Calibração e avaliação de desempenho de modelos hidráulicos com dados observados de imagens de satélite	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Caracterização da topografia do vale de jusante	28
4.2	Imagens de Satélite	30
4.3	Modelo Digital de Terreno.....	31
5	DESEMPENHO DOS MODELOS HIDRODINÂMICOS 1D E 2DH PARA ESTIMATIVA DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO.....	32

5.1	Área de Estudo	32
5.2	Estudo morfométrico.....	32
5.3	Simulações Hidrodinâmicas.....	38
5.3.1	Rede de simulação 1D.....	43
5.3.2	Rede de simulação 2DH.....	45
5.4	Calibração dos modelos 1D e 2DH.....	48
5.4.1	Resultado da calibração dos modelos	49
5.5	Resultados das Simulações – manchas de inundação.....	52
5.6	Comparação dos resultados das simulações 1D e 2DH.....	58
5.7	Classificação da imagem de satélite.....	59
5.8	Avaliação do desempenho dos modelos 1D e 2DH.....	61
6	EFEITO DA MORFOLOGIA DO VALE DE JUSANTE NO DESEMPENHO DO MODELO HIDRÁULICO	69
7	CALIBRAÇÃO COM ALTA DENSIDADE DE DADOS OBSERVADOS	73
7.1	Comparação entre os resultados da calibração convencional e de alta densidade de dados observados	76
8	DISCUSSÃO E ANÁLISE CRÍTICA.....	80
8.1	MDT	80
8.2	Configuração das redes de simulação dos modelos	81
8.3	Classificação da imagem do evento observado.....	86
9	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	88

10	REFERÊNCIAS.....	93
----	------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A previsão de áreas potencialmente inundáveis é uma atividade frequentemente exigida nos estudos hidrológicos e hidráulicos que envolvem eventos de grande magnitude de descargas, como nas estimativas de impactos de rompimento de barragens, avaliação de cheias extremas, diagnósticos de sistemas de drenagem, alterações nos níveis d'água causados por intervenções nos corpos hídricos etc. Nestas situações, as estimativas dos níveis d'água máximos, tempos de permanência, tempo de impacto, velocidades e risco hidrodinâmico (velocidade x profundidade) frequentemente apresentam dificuldades de cálculo, seja pela quantidade de dados e informações exigidas, como para a formulação dos cenários a serem pesquisados.

Modelos matemáticos são ferramentas essenciais na engenharia hidráulica especialmente em estudos relacionados ao gerenciamento de riscos e segurança dos vales de jusante de barragens. Espera-se que os modelos de simulação hidrodinâmica empregados na estimativa de áreas inundáveis tenham representatividade e eficiência compatíveis com a magnitude dos riscos envolvidos nestes estudos (PINOS; TIMBE; TIMBE, 2019).

As dificuldades para mapear as áreas inundadas, geralmente designadas como “gerar manchas de inundação”, em planícies laterais envolvem o grau de precisão do modelo digital de elevação, que é condicionada à qualidade do dado de entrada originalmente empregado (LUCCI; MARTINS; MACEDO; SILVA, 2012) e principalmente o método de cálculo das linhas d'água, ou seja, o modelo hidráulico que será utilizado para a estimativa dos níveis d'água, que pode ser unidimensional (1D), bidimensional horizontal (2DH) e até mesmo tridimensional (3D) (COLLISCHONN; TUCCI, 2009).

Os modelos hidrodinâmicos, seja 1D, 2D ou 3D, necessitam de informações de terreno topográficas e batimétricas para compor os dados hidrogeométricos utilizados nos cálculos que fornecem como resultados os níveis d'água. Para alimentar os modelos com estas informações são necessários arquivos de modelos digitais de terreno (MDT), que possuem diferentes precisões espaciais e altimétricas, e isto

interfere diretamente nos resultados da modelagem, onde MDTs menos precisos são aceitáveis para avaliações preliminares, enquanto informações de terrenos com melhores resoluções apresentam resultados de modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas mais condizentes com a realizada (GARCIA; ALIXANDRINI JÚNIOR, 2022).

Grande parte dos cursos d'água estudados através de modelos matemáticos apresentam uma configuração em que as duas dimensões horizontais, uma longitudinal e outra transversal ao eixo do rio, são mais significativas que a dimensão vertical, e possuem uma relação de quilômetros para metros, ou seja, a dimensão longitudinal ao eixo do rio é mil vezes maior que a dimensão vertical. Desta forma os estudos de linha d'água e a geração de manchas de inundação em rios podem ser bem representados por modelos matemáticos 1D e 2DH (DA SILVA; LUCCI; MARTINS; ARAÚJO, 2013).

Por outro lado, os cursos d'água que apresentam declividade baixa com planícies de inundação planas e extensas dificultam a definição correta do limite das áreas potencialmente inundáveis por meio de modelação matemática, uma vez que as manchas de inundação são geradas quando o nível d'água supera a cota do terreno. Com estas características os resultados gerados por ambos os modelos podem diferir significativamente (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2012; FERNANDEZ, 2015).

Neste sentido há uma grande área a ser explorada no que diz respeito às vantagens e desvantagens da utilização dos modelos 1D e 2D (HORRITT; BATES, 2002), e quando cada um deles deve ser aplicado para que os resultados calculados sejam fidedignos aos observados. Muitas vezes ambos os modelos podem apresentar bons resultados, devendo sua escolha ser baseada nas vantagens computacionais, como tempo de processamento e vantagens relacionadas à construção da rede de simulação que um modelo pode ter sobre o outro (LAURIANO, 2009).

Alguns estudos comparativos podem ser encontrados nas literaturas sobre modelagem de áreas de inundação (DIMITRIADIS; TEGOS; OIKONOMOU; PAGANA *et al.*, 2016), porém não apresentam explicitamente recomendações para adoção de um ou outro, motivo pelo qual esta pesquisa se justifica.

Os vales a jusante de barragens apresentam características morfológicas particulares, se diferenciando um dos outros. Trechos de vales localizados na região de montante de uma bacia geralmente apresentam maiores declividades longitudinais e menores transversais, representados por talwegues com geomorfologia encaixada no vale. É comum nas regiões a jusante das bacias encontrar cursos d'água com declividades baixas e planícies laterais extensas.

Neste contexto, os diferentes modelos hidrodinâmicos, 1D, 2DH ou 3D, podem gerar diferentes resultados para cada vale, em função das suas particularidades geomorfológicas, e assim estimando áreas potencialmente inundáveis diferentes. Desta forma, a avaliação do desempenho destes modelos pode ser relacionada com diferentes morfologias de vales.

Com relação à eficiência dos resultados, a calibração de modelos hidrodinâmicos é essencial para que os resultados sejam compatíveis com a realidade do local estudado, e podem ser entendidos como processo que fazem a conexão entre os conceitos analíticos e a eficiência desejada por meio de ajustes dos parâmetros das equações. Usualmente a calibração é realizada por meio de processos de 'tentativa e erro' ou 'minimização automática de erros', e visa determinar os parâmetros hidráulicos ligados aos fatores de atrito e turbulência como a rugosidade de Chèzy-Manning e outros, com base nos dados observados de nível d'água e vazões em postos hidrometeorológicos. O nível d'água no trecho entre dois postos fluviométricos não é medido, e desta forma não é considerado na avaliação da precisão do modelo, o que implica em erros consideráveis na estimativa de áreas alagadas localizadas nos vales, apesar da sofisticação dos modelos empregados (GARAMBOIS; CALMANT; ROUX; PARIS *et al.*, 2017).

Neste contexto, é muito importante que os modeladores tenham um método alternativo de calibração que aproveite a disponibilidade dos dados de sensoriamento remoto distribuídos, como imagens de satélite ou aéreas ao longo dos eventos de inundação, de forma que se possa considerar o armazenamento de água nas planícies de inundação (DI BALDASSARRE; SCHUMANN; BATES, 2009).

Imagens de satélite de uma cheia permite distinguir situações de ocupação das planícies alagadas ao longo de todo o vale, que se reflete no aumentando da

resolução espacial dos postos de controle do modelo, e pode ser utilizada tanto para a calibração quanto para avaliar o desempenho de diferentes modelos. Outras tecnologias de imageamento remoto também podem ser utilizadas, como interferômetro e radares LiDAR, que estão sendo cada vez mais utilizados na modelagem hidráulica para estudos de inundação (COOK; MERWADE, 2009; HUȚANU; MIHU-PINTILIE; URZICA; PAVELUC *et al.*, 2020; WEDAJO, 2017).

O presente estudo foi dividido e segue estrutura de acordo com a itemização apresentada a seguir: 1. Introdução; 2. Objetivos; 3. Revisão da literatura; 4. Materiais e métodos; 5. Desempenho dos modelos hidrodinâmicos 1D e 2DH para estimativa de manchas de inundação; 6. Efeito da morfologia do vale de jusante no desempenho dos modelos hidráulicos; 7. Calibração com alta densidade de dados observados; 8. Discussão e análise crítica; 9. Conclusão e recomendações; e Referências.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o desempenho de modelos hidrodinâmicos 1D e 2DH e relacioná-lo com a morfologia do vale a jusante de barragens, que compreendem a declividade do talvegue e da planície de inundação. Esta análise visa contribuir na tomada de decisão de escolha do modelo mais adequado a ser utilizado em cada caso, de forma a otimizar o esforço despendido no desenvolvimento dos estudos hidrodinâmicos, que envolvem principalmente a montagem da topologia de simulação, estabelecimento de cenários e análise dos resultados.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar a topografia dos vales de jusante por meio de estudo morfométrico;
- Montar redes de simulação 1D e 2DH para cada vale de jusante estudado;
- Classificar imagem de satélite de cheias para a obtenção de mancha de inundação observada;
- Realizar simulações hidrodinâmicas unidimensionais e bidimensionais com a utilização do software HEC-RAS;
- Confrontar os resultados das simulações com a cheia observada por meio de comparação e análise binária pixel-a-pixel de classificação dos (P) Positivos, (N) Negativos, (FP) Falsos Positivos e (FN) Falsos Negativos;
- Comparar os resultados e avaliar o desempenho dos modelos 1D e 2DH;
- Propor um método alternativo de calibração dos modelos com a utilização de imagem de satélite com alta densidade de dados observados

3 REVISÃO DA LITERATURA

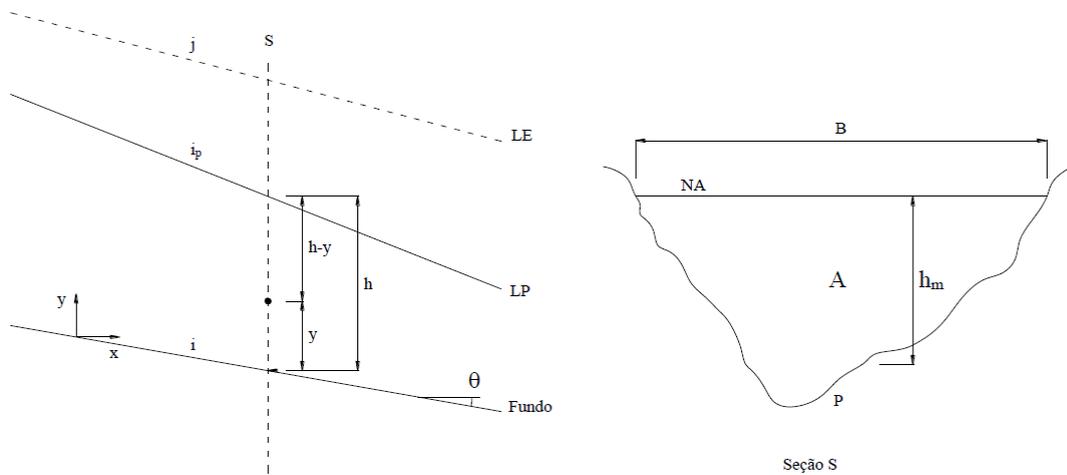
As barragens possuem características particulares como a altura e largura do barramento, o volume armazenado e, relacionada a morfologia do vale a jusante, a declividade e a extensão da várzea. Estas características são grandezas que estão diretamente relacionadas com a extensão da área impactada e com o tempo de propagação das ondas de inundação. Por serem grandezas diferentes entre as barragens, os resultados dos impactos causados por cheias extraordinárias e por rupturas podem ser significativamente diferentes também. O conjunto destas características deve ser considerado nos métodos de avaliação e zoneamento de áreas impactadas (LUCCI; MARTINS; BERNARDINO; JÚNIOR *et al.*, 2018).

Neste contexto, no âmbito deste trabalho e para subsidiar o desenvolvimento dos estudos, a revisão da literatura buscou informações e conceitos relacionados ao escoamento de canais, modelos hidráulicos, soluções numéricas, modelos digitais de terreno e de superfície, modelos de geração de manchas de inundação, comparação de resultados com software de simulação hidrodinâmicas 1D e 2D, calibração de modelos, avaliação de desempenho de modelos com dados observados de imagens de satélites.

3.1 Escoamento em canais

O escoamento em canais pode ser definido como aquele que possui uma superfície livre sujeita a pressão atmosférica. A característica principal do escoamento é que ele ocorre pela ação da gravidade (BERNARDINO, 2005). Os parâmetros de variabilidade dos escoamentos em canais são o espaço e o tempo, onde as características hidráulicas como altura d'água, área molhada, raio hidráulico podem variar (PORTO, 2006). Estas características são alguns dos parâmetros que representam geometricamente um canal. A Figura 1 apresenta as características hidrogeométricas de uma seção transversal de um escoamento em canal.

Figura 1 – Características hidrogeométricas de uma seção transversal em um escoamento em canal



Fonte: (BERNARDINO, 2005)

- A: área molhada;
- P: perímetro molhado;
- R_h : raio hidráulico;
- B: largura da superfície livre da água;
- y: distância na vertical de um ponto do escoamento até o fundo do canal;
- h: profundidade do escoamento medida na vertical;
- h_m : altura hidráulica, razão entre A e B;
- i: declividade do fundo do canal;
- i_p : declividade piezométrica ou linha d'água;
- j: declividade da linha de energia;
- LE: linha de energia do escoamento;
- LP: linha piezométrica ou linha d'água;

Quanto à variação no espaço os escoamentos podem ser uniformes e variados (não uniformes). Os uniformes são aqueles cujas velocidades são constantes ao longo da trajetória do escoamento, onde o perfil de distribuição de velocidades é igual em todas as seções transversais do canal em um dado instante. Quando este perfil de velocidade varia entre as seções o escoamento é variado ou não uniforme.

Quanto à variação no tempo, o escoamento pode ser permanente, quando a velocidade e massa específica permanecem constante ao longo do tempo, e o não permanente quando variam.

Nos rios, com seções naturais ou artificiais, o escoamento raramente é permanente, pois a velocidade varia constantemente ao longo do tempo por conta das variações das vazões transportadas e das seções transversais.

3.2 Modelos hidrodinâmicos

Modelos matemáticos hidrodinâmicos são as equações que representam a dinâmica dos escoamentos nos cursos d'água.

Atualmente os softwares que fazem uso das equações da hidrodinâmica são chamados de modelos matemáticos ou modelos hidrodinâmicos, porém na realidade são as ferramentas que facilitam a utilização dos modelos com suas interfaces sofisticadas e amigáveis, que tornam mais ágil o trabalho de aplicação das condições de contorno (entrada de dados) e análise dos resultados. É fato que o software contribui e muito para a eficiência do modelo, como também para a eficiência do método numérico (MARTINS, 2017).

Os princípios básicos da hidrodinâmica são as equações da continuidade (ou da conservação da massa) e da quantidade de movimento (segunda lei de Newton).

Os escoamentos têm sido descritos com o rigor matemático e da física newtoniana desde os trabalhos de Newton, Bernoulli, Euler, Lagrange, Navier, Cauchy, Saint-Venant, Poisson e Stokes (SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2017).

As equações de Navier-Stokes que descrevem como estão relacionadas a velocidade, pressão, temperatura e densidade de um fluido em movimento, foram derivadas independentemente por Claude Louis Marie Henri Navier na França, e por George Gabriel Stokes, na Inglaterra. Estas equações são extensões das equações de Euler e incluem os efeitos da viscosidade no escoamento (NASA, 2015).

Navier foi um grande especialista em construção de estradas e pontes, porém ficou universalmente conhecido por deduzir as equações do movimento fluido em 1822, apesar de não compreender totalmente a física da situação que estava modelando por não conhecer o conceito das tensões de cisalhamento em um fluido. Baseando seu trabalho em modificar as equações de Euler para levar em consideração as forças entre as moléculas do fluido (J; E, 2000b; MIRANDA, 2007).

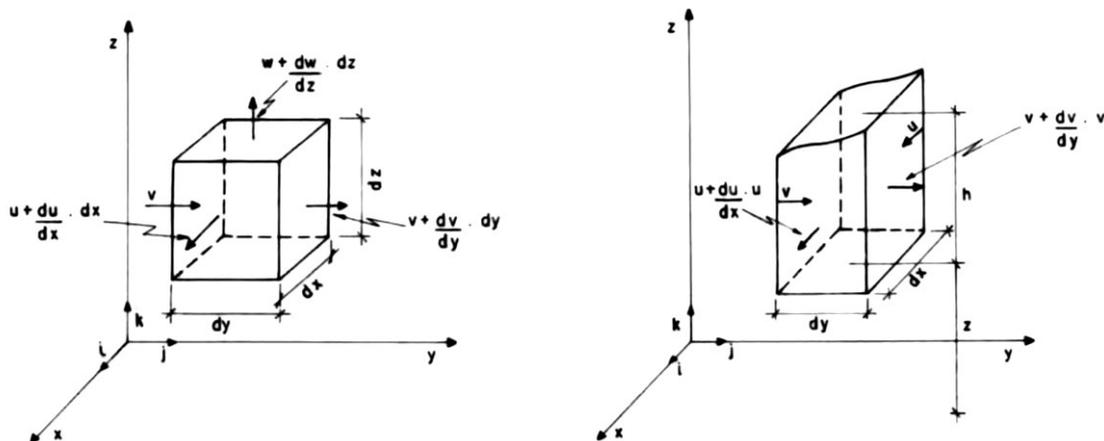
Stokes depois de deduzir corretamente as equações do movimento que levava em conta o atrito interno nos fluidos, descobriu que ele não havia sido o primeiro a obtê-las, pois Navier, Poisson e Saint-Venant já haviam considerado o problema. Porém Stokes considerou que seus resultados foram obtidos com suposições suficientemente diferentes para justificar a publicação, e em 1845 publicou o artigo “*On the theories of the internal friction of fluids in motion*” (J; E, 2003).

Saint-Venant re-derivou as equações de Navier considerando as tensões viscosas internas e publicou em 1843 o primeiro artigo a identificar adequadamente o coeficiente de viscosidade e seu papel como fator multiplicador dos gradientes de velocidade no escoamento. Não se sabe o porquê de seu nome não ter sido associado as estas equações (ANDERSON, 1997; J; E, 2000a).

3.2.1 Modelos Bidimensionais Horizontais (2DH)

O escoamento bidimensional 2DH, também conhecido como modelos de águas rasas, despreza a aceleração vertical das partículas do fluido, por esta ser muito pequena em relação a aceleração da gravidade. O 2DH é uma simplificação do caso genérico tridimensional e tem grande aplicação nos estudos de rios, estuários e lagos com pequenas profundidades (MARTINS, 1989; 2017). A Figura 2 apresenta o elemento fluido de volume no escoamento tridimensional e bidimensional que é limitado pela superfície livre e pelo contorno fixo no limite inferior.

Figura 2 – Elemento de volume a) escoamento tridimensional e b) escoamento bidimensional



Fonte: (MARTINS, 1989)

A seguir apresenta-se a equação da continuidade (1) para o escoamento em duas dimensões:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial U}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Para a equação da quantidade de movimento tem-se:

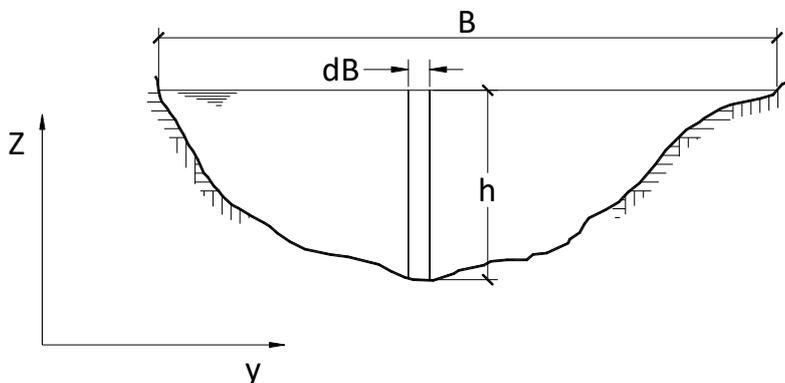
$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \rho g \frac{U(U^2 + V^2)^{1/2}}{c^2 h} - \frac{\tau_x^w}{\rho h} + \Omega U = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \rho g \frac{V(U^2 + V^2)^{1/2}}{c^2 h} - \frac{\tau_y^w}{\rho h} + \Omega V = 0 \quad (3)$$

3.2.2 Modelos Unidimensionais (1D)

A formulação do escoamento unidimensional considera os valores médios verticais e laterais de uma seção transversal de um rio, e pode ser feita integrando-se ao longo da largura B . A Figura 3 apresenta a seção transversal de um canal natural.

Figura 3 – Seção transversal de um rio



A equação da continuidade (4) e a equação da quantidade de movimento (5), conhecidas como “*Equações de Saint-Venant*”, largamente aplicadas no cálculo dos escoamentos unidimensionais, poderiam ser substituídas pelas equações de Navier-Stokes com média em Reynolds ou por modelos de turbulências, porém a complexidade computacional ainda se faz considerar as equações de Saint-Venant adequadas aos casos práticos que são avaliados com rapidez e aproximação compatível com as necessidades da engenharia (SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2017).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

(4)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS = 0$$

(5)

3.3 Modelos digitais de terreno e de superfície

Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de Superfícies (MDS) são modelos que representam a superfície terrestre e se diferem respectivamente por representar tudo que há na superfície, vegetação, edificações etc., e por representar o terreno propriamente dito, onde as vegetações estão enraizadas e as edificações fundadas.

A partir dos dados brutos de levantamentos a Laser, aerofotogrametria ou por satélites, os MDTs e os MDSs são gerados por meio de filtragem que classificam ponto do terreno e fora do terreno, e por interpolação para o preenchimento de lacunas (HÖHLE; HÖHLE, 2009).

A disponibilidade de Modelos Digitais de Elevação (MDE) publicados por agências de pesquisa e desenvolvimento como o SRTM - Shuttle Radar Topography Mission, desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) nos Estados Unidos em 2000, o ASTER GDEM - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

Global Digital Elevation Model, desenvolvido pelo consórcio entre o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) e a NASA, e os derivados do SRTM, como os dados do Brasil em Relevo da EMBRAPA e TOPODATA, disponibilizado pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, tornou relativamente acessível o uso da representação espacial do terreno e, dependendo da particularidade de cada estudo, muitas vezes não se faz necessária a geração de MDEs a partir da recuperação de dados cartográficos. Para que estes MDEs possam ser utilizados em aplicações de recursos hídricos, como os estudos de manchas de inundação resultantes de simulações cheias, rompimento de barragens e operação de reservatórios, a precisão das altitudes fornecidas por estes modelos deve ser cuidadosamente analisada, de forma a se estabelecer a confiabilidade dos produtos elaborados.

Uma forma de avaliar a altimetria dos MDEs consiste na comparação das altitudes dos modelos com as de pontos de controle, como os marcos geodésicos do Sistema Geodésico Brasileiro do IBGE, nos respectivos posicionamentos. Posteriormente realiza-se uma análise estatística com a diferença entre as altitudes para a avaliação altimétrica seguindo os critérios dispostos na Norma Técnica da Cartografia Nacional Decreto Nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Este decreto define a classificação de uma carta quanto a sua exatidão.

A norma técnica mencionada acima define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), cujo critério é noventa por cento dos pontos isolados de altitude, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao limite do Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico – estabelecido.

Tabela 3-1 – PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica

Classe	Escala					
	1:25.000		1:50.000		1:100.000	
	Erro	Tolerância	Erro	Tolerância	Erro	Tolerância
A	6,6m	<5m	6,6m	<10m	16,7m	<25m
B	8m	<6m	8m	<12m	20m	<30m
C	10m	<7,5m	10m	<15m	25m	<37,5m

Fonte: adaptado de (BRASIL, 20 de julho de 1984)

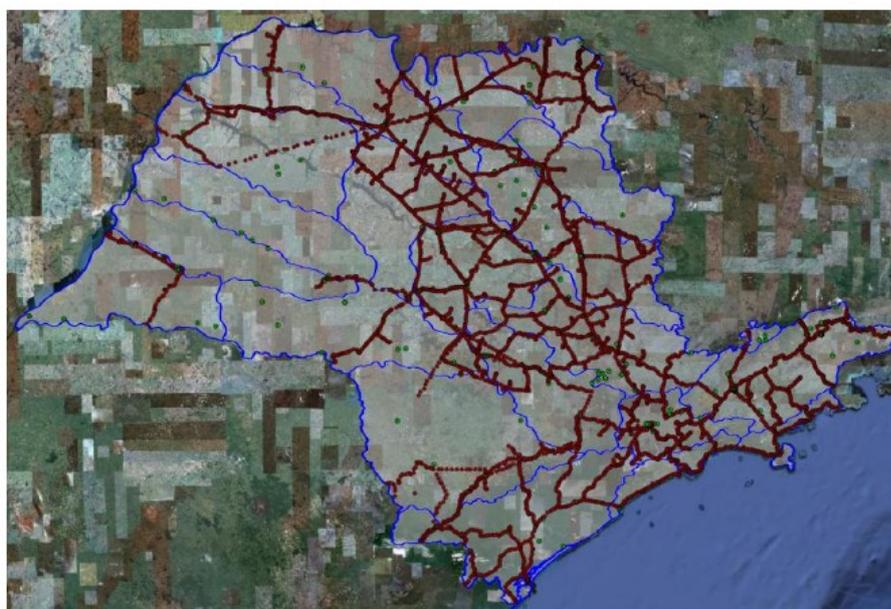
Para o cálculo do Erro Quadrático Médio ou Erro Padrão utilizou-se a equação a seguir:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (6)$$

onde ε_i é a diferença entre os valores da cota do ponto de controle e do MDE, e n é o número de pontos de controle que foram utilizados.

O estudo apresentado por Lucci et. al (2012) quantificou os marcos geodésicos do IBGE contidos em cada Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI do Estado de São Paulo e avaliou separadamente o PEC em cada UGRHI para os MDEs: Topodata, Aster e SRTM. A Figura 4 apresenta a distribuição dos marcos geodésicos no Estado de São Paulo, e a Figura 5 os limites das UGRHI.

Figura 4 – Distribuição dos Marcos Geodésicos no Estado de São Paulo – Estações RN em vermelho e Estações SAT em verde.



Fonte: adaptado do Google/IBGE

Figura 5 – Limites das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI.



Fonte: (LUCCI; MARTINS; MACEDO; SILVA, 2012)

O MDEs TOPODATA e SRTM apresentaram precisão ligeiramente superior quando comparados com o ASTER para as regiões estudadas, exceto para a UGRHI Mantiqueira onde o ASTER obteve classificação “B” enquanto os demais obtiveram classificação “C” para a escala 1:100.000. A Tabela 3-2 apresenta o PEC dos MDEs Topodata, Aster e SRTM em cada UGRHI.

Tabela 3-2 – PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica para as UGRHIs nos diferentes MDEs

UGRHI	Escala: 1:50.000			Escala: 1:100.000		
	Topodata	ASTER	SRTM	Topodata	ASTER	SRTM
Alto Paranapanema	-	-	-	-	-	-
Alto Tietê	-	-	-	A	A	A
Baixada Santista	-	-	-	-	-	-
Baixo Pardo Grande	B	B	B	A	A	A
Baixo Tietê	-	-	-	-	-	-
Tietê/Jacaré	-	-	-	C	C	C
Litoral Norte	-	-	-	-	-	-
Mantiqueira	-	-	-	C	B	C
Médio Paranapanema	-	-	-	-	-	-
Médio Tietê/Sorocaba	-	-	-	-	-	-
Mogi Guaçu	-	-	-	C	-	C
Paraíba do Sul	-	-	-	-	-	-
Pardos	-	-	-	C	C	C
Piracicaba Capivari Jundiá	-	-	-	A	A	A
Pontal do Paranapanema	-	-	-	B	C	B
Rib, de Iguape Litoral Sul	-	-	-	-	-	-
São José dos Dourados	-	-	-	B	C	B
Sapucaí/Grande	-	-	-	C	C	B
Tietê/ Batalha	B	-	B	A	A	A
Turvo Grande	-	-	-	B	B	B

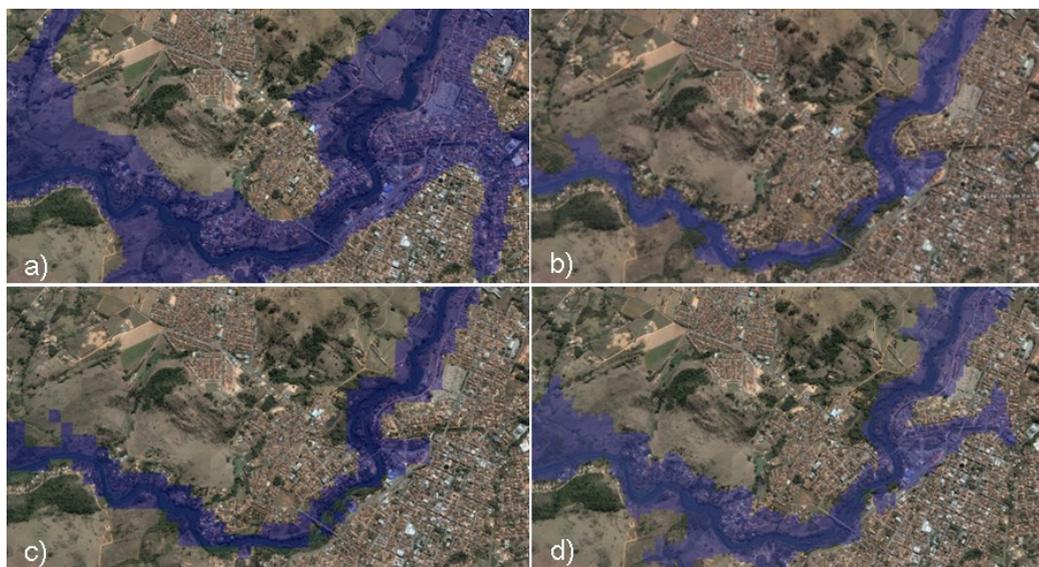
Fonte: (LUCCI; MARTINS; MACEDO; SILVA, 2012)

Para comparação visual das informações apresentadas na Tabela 3-2, Lucci et. al (2012) geraram, a partir de um mesmo resultado de linha d'água, quatro manchas de inundação hipotéticas para a região do município de São José do Rio Pardo, localizada na UGRHI Pardo.

Na Figura 6 a mancha de inundação a) foi modelada sobre um MDE com um grid de 30 m, gerado a partir das cartas topográficas do IBGE na escala 1:50.000, a mancha b) foi modelada sobre o MDE TOPODATA de GRID 30 m, a c) sobre o SRTM de GRID 90 m, e a d) sobre o ASTER de GRID 30 m.

Verificou-se que um MDE que atende apenas o PEC C para a escala 1:100.000, como é o caso dos MDEs avaliados na região da UGRHI Pardo, não é satisfatório para a geração de manchas de inundação, pois MDEs com esta imprecisão altimétrica podem gerar resultados equivocados, reduzindo a área inundada. A Figura 6 apresenta a comparação da mancha modelada sobre um MDE gerado com dados oficiais a partir das cartas topográficas do IBGE.

Figura 6 – Manchas de inundação geradas com base em diferentes MDEs: a) MDE com base nas cartas 1:50.000 do IBGE; b) MDE TOPODATA; c) MDE SRTM e d) MDE ASTER.



Fonte: (LUCCI; MARTINS; MACEDO; SILVA, 2012)

Com a disponibilidade de imagens de satélites de alta resolução, como as apresentadas por aplicativos populares, tais como o "Google Earth", que permite por vezes a discretização até o nível dos imóveis, a visualização destas áreas inundadas

pode ser interpretada erroneamente. Isto ocorre pelo fato de as manchas de inundação serem geradas a partir de MDTs ou MDSs com resolução inferior à das imagens de satélite sobre as quais são visualizadas.

Resultados de estudos de avaliações altimétricas de MDE, que representam os MDSs e os MDTs, sugerem que na apresentação das manchas de inundação sejam informadas as respectivas precisões espaciais dos MDEs utilizados na geração das mesmas. Desta forma, a visualização confiável das áreas inundáveis fica restrita a uma escala. Se essa escala não for respeitada, como por exemplo, por meio do “zoom” de uma ferramenta GIS, restringindo a aproximação máxima da visualização de um resultado de mancha quando visto em um servidor de mapas, a confiabilidade das informações apresentadas naquele mapa não estará mais garantida.

Com relação à altimetria dos MDEs, é importante salientar que a imprecisão altimétrica pode acarretar resultados equivocados de manchas de inundação, tanto no aumento quanto na diminuição da área atingida. Desta forma recomenda-se que a avaliação altimétrica seja realizada a cada estudo, podendo ser utilizada a classificação do Padrão de Exatidão Cartográfica como referência, devendo ser aprimorada com o aumento do número de pontos de controle (LUCCI; MARTINS; MACEDO; SILVA, 2012).

Em um artigo apresentado no Third International Dam World Conference Duarte *et al.* (2018) analisou a diferença entre áreas inundadas geradas sobre um MDS e um MDT, comparando-as com a imagem de satélite registrada na data do mesmo evento hidrológico das simulações hidrodinâmicas. A mancha de inundação do MDS apresentou 28% de erros causados por superestimação da área inundada, enquanto do MDT apresentou apenas 7,9 %. Em estudos de avaliação de risco no vale de jusante é preferível a utilização de manchas que superestimem a área inundada (DUARTE; LUCCI; BERNARDINO; MARTINS, 2018).

3.4 Modelos de geração de manchas de inundação

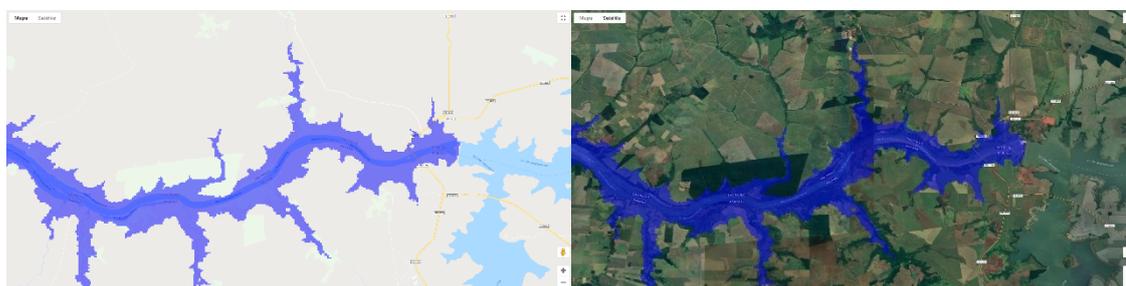
Mancha de inundação é a representação em planta da área atingida pela água quando ocorre o extravasamento da estrutura de drenagem e o nível d'água supera a cota do terreno.

Com o avanço das ferramentas computacionais, em especial do Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG), diversas formas de gerar área inundada surgiram.

No estudo realizado para a área urbana do município de Lajeado no Rio Grande do Sul, foi utilizado o módulo Virtual GIS do software Erdas Imagine, cujo método de geração de área inundada inclui uma camada virtual de água sobre o MDE e a ortoimagem. Esta camada é ajustada no nível d'água previsto que o rio atinge nos períodos de alta precipitação pluviométrica (ECKHARDT, 2008).

A Figura 7 apresenta um exemplo de mancha de inundação gerada com a sobreposição em um MDE de um plano que representa o nível d'água. Esta mancha foi gerada na cota 310 m em um trecho do rio Paranapanema localizado a jusante da UHE Capivara, com a cota da crista da barragem em 339 m.

Figura 7 – Mancha de inundação gerada com a sobreposição de um plano em um MDE.



Fonte: (Flood Map: Water Level Map (Beta), 2018)

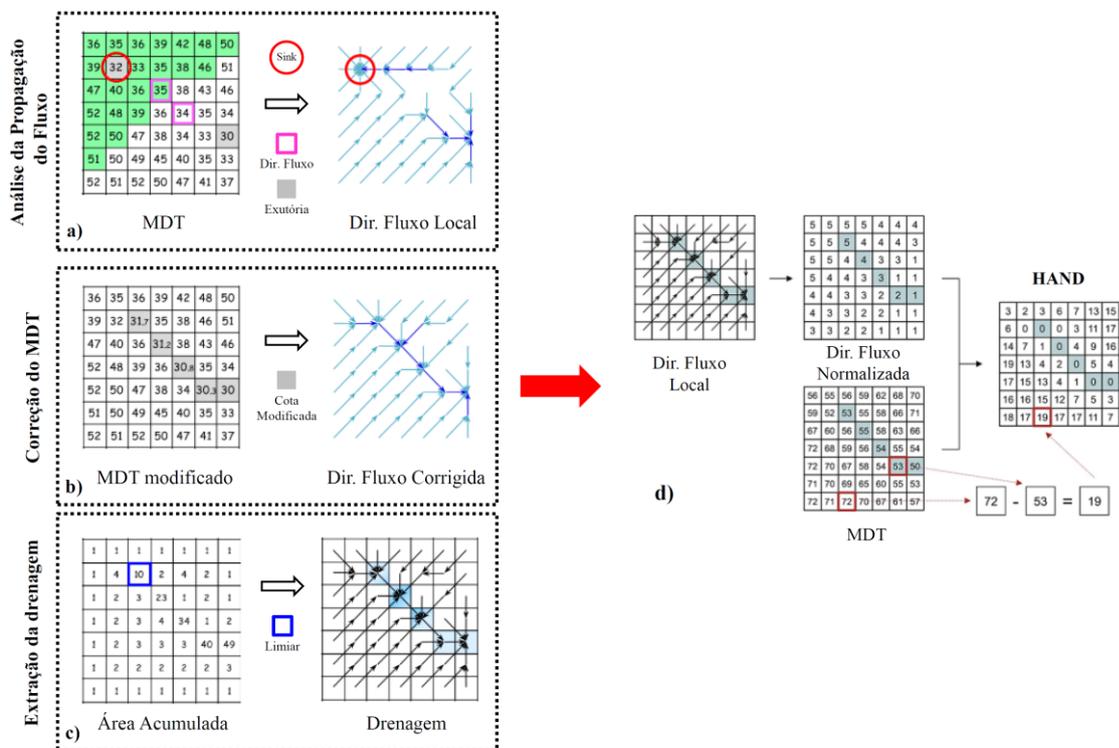
Como alternativa aos tradicionais métodos de mapeamento de áreas inundáveis que utilizam resultados de linhas d'água dos modelos hidrológicos-hidráulicos, são aplicados descritores do terreno com base em atributos morfométricos. Estes descritores são definidos como atributos hidrogeomorfológicos extraídos diretamente do MDE, que possui correlação espacial com áreas propensas a inundação (GOERL; CHAFFE; SPECKHANN; MARCEL *et al.*, 2017).

Rennó e Nobre (NOBRE; CUARTAS; MOMO; SEVERO *et al.*, 2015; RENNÓ; DALELES; NOBRE; DONATO *et al.*, 2008) propuseram o modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND), um descritor para o mapeamento de áreas inundáveis.

O modelo HAND usa a distância vertical para a drenagem mais próxima para desenvolver uma abordagem estática e mapear as áreas potencialmente inundáveis. O método utiliza a topografia (MDE) normalizada de drenagem e os caminhos de fluxo para delinear as distâncias verticais relativas até ao rio mais próximo (NOBRE; CUARTAS; MOMO; SEVERO *et al.*, 2015).

O processo é desenvolvido em três etapas, a primeira realiza a correção hidrológica do MDE e garante a propagação do escoamento em todas as células, e determina a direção e área de acumulação de escoamento de cada célula. A Segunda é obtenção da rede de drenagem a partir do MDE hidrológicamente coerente. A terceira etapa consiste na normalização da altimetria com base nas cotas da drenagem, obtendo como resultado o MDE reclassificado com base na diferença entre a cota da drenagem mais próxima e as cotas das planícies de inundação (MOMO; PINHEIRO; SEVERO; CUARTAS *et al.*, 2016).

Figura 8 – Etapas do modelo HAND: a) consistência hidrológica; b) determinação da direção de escoamento; c) definição da rede de drenagem e d) normalização do MDE.



Fonte: (GOERL; CHAFFE; SPECKHANN; MARCEL *et al.*, 2017)

O modelo tradicional de geração de manchas de inundação é acoplado ao modelo hidráulico que calcula os níveis d'água (NA) na rede de drenagem e posteriormente gera as áreas potencialmente inundáveis por meio de comparação do NA com a cota do terreno. O diferencial deste modelo é que o NA é obtido com a modelagem matemática dos fenômenos físicos que ocorrem no escoamento, que levam em conta as influências das estruturas hidráulicas como os barramentos e as travessias, estrangulamentos de seção, tipo de revestimento da calha, além de relacionar os NAs com períodos de retorno (TR) dos eventos hidrológicos.

O software para simulação de escoamento em condutos livres CLiv, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica, efetua o cálculo da área inundada sobre um MDE, onde os NAs resultantes da simulação são confrontados com a cota do terreno, e os pontos onde o NA ficar acima do terreno é considerado como inundado (FCTH, 2002).

A rotina de geração de área inundada do CLiv é descrita a seguir Martins (2018)¹ (informação verbal):

- O NA é calculado a cada 20 m ao longo do eixo dos canais que formam a rede, interpolando linearmente entre os NAs calculados para o instante selecionado ou para a envoltória de máximos, nas duas seções mais próximas.
- A rotina percorre cada canal de jusante para montante e em cada ponto (20 m) definido no passo anterior, traça uma ortogonal ao eixo do canal até a distância máxima de busca (buffer) definida preliminarmente nos parâmetros para traçado da área inundável.
- Percorre cada ortogonal comparando a cota do NA do ponto com o terreno e atribui em uma matriz auxiliar a profundidade no ponto. Se o ponto já estiver marcado por uma outra seção (caso de curvas) a rotina anota a maior profundidade.

¹ Informação fornecida por José Rodolfo Scarati Martins

- Para cada ponto do terreno não marcado que está dentro da distância de busca (buffer) do eixo, interpola linearmente entre as cotas dos pontos vizinhos e compara com o terreno, e grava na memória a profundidade.
- Percorre todos os pontos de borda e aplica um filtro nas coordenadas para eliminar o serrilhado formado pelas quadrículas do MDE.

Figura 9 – Mancha de inundação gerada pelo CLiv.



Fonte: (FCTH, 2011)

O Sistema de Processamento de Informações Georreferenciada (SPRING), desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagem (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), apresenta a função “Mancha de Inundação” para a geração de áreas potencialmente inundáveis. Esta função utiliza como base, além do MDE, os níveis d’água extraídas de modelos hidráulicos (SILVA, 2006). O método da função “Mancha de Inundação” proposto por Rosim (2003) apud (SILVA, 2006) é baseado na distância mínima entre cada posição do espaço de busca e a cota de inundação. O procedimento para a geração da mancha de inundação do SPRING é apresentado a seguir:

- Uniformização da representação vetorial dos rios;
- Determinação da posição de cada cota de inundação na representação vetorial do rio correspondente;
- Interpolação de novas cotas de inundação;
- Delimitação da mancha de inundação a partir das cotas de inundação originais e interpoladas.

O software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers*), a partir da versão 5, possui uma ferramenta para a visualização dos resultados em planta denominado RAS Mapper.

Esta ferramenta gera diversos resultados em planta com base no modelo digital de elevação: mapa de profundidades, de elevação do nível d'água, velocidade, limite de inundação, além da combinação destes resultados. A profundidade é calculada com base na diferença entre as elevações da superfície da água e a camada do terreno (USACE, 2016b). O limite das extensões do mapeamento de inundação é dado pelas linhas de borda (*Edge Line*), que são definidas pelo limite das seções transversais (USACE, 2018).

Figura 10 – Seções transversais com as linhas de borda, e mancha de inundação com resultado de profundidades – HEC-RAS



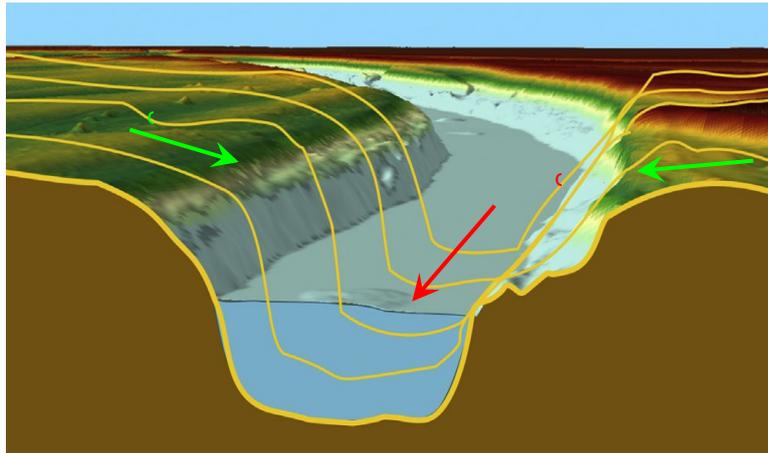
Fonte: (USACE, 2016b)

3.5 Estudos com modelos 1D e 2DH

Estudos hidráulicos em rios e canais apresentam o escoamento na calha principal predominantemente em uma direção (x), e o escoamento nas planícies de

inundação (várzeas) em duas direções, x e y. O fluxo na direção z vertical é desprezada, pois a aceleração vertical das partículas do fluido é significativamente menor que nas demais direções.

Figura 11 – direcionamento do fluxo em estudos hidráulicos de rios e canais



Fonte: adaptado de (TENG; JAKEMAN; VAZE; CROKE *et al.*, 2017)

Fernandez (2013) comparou a delimitação de zonas de inundação geradas pelos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP. Neste estudo foi aplicado a versão unidimensional do HEC-RAS que resolve as equações de Saint-Venant completas. O modelo LISFLOOD-FP representa de forma separada o escoamento no leito do rio e na zona inundável, baseando-se respectivamente na formulação matemática em uma representação 1D com a aplicação da onda cinemática, e 2D onde aplica a aproximação da onda difusa das equações 2D de Saint-Venant (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013).

Os dois modelos foram calibrados para um evento hidrológico conhecido (outubro de 2006), e os resultados de área inundada foram comparadas entre si com a aplicação de uma medida de desempenho F apresentado por (HORRITT; BATES, 2002). Esta medida F varia entre 0%, quando não existe sobreposição entre os resultados das zonas inundadas, e 100% quando existe uma sobreposição total (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013).

As áreas inundadas geradas pelos dois modelos apresentaram resultado de sobreposição de 65%. Fernandez (2013) conclui com uma descrição das vantagens e

desvantagens dos modelos, como o tempo de resposta da onda de cheia no modelo HEC-RAS é metade do tempo verificando no LISFLOOD-FP, e o tempo de simulação foi menor que 1 minuto e de 12,6 horas respectivamente. O HEC-RAS apresenta limitações na modelação da zona inundável devido à formulação 1D, que calcula o NA para as seções transversais e utiliza a interpolação para calcular as previsões nas zonas estre as seções, enquanto no LISFLOOD-FP esse cálculo é efetuado para cada célula da área inundada, e por isso apresenta maior detalhe na representação da extensão de inundação (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013).

Salienta-se a importância de calibrar e validar não apenas os níveis d'água resultantes das simulações de eventos conhecidos (dados hidrométricos), mas também os resultados de mancha de inundação por meio de comparação de imagens de satélites registradas em eventos que acarretaram inundação.

Horritt e Bates (2002) apresentaram um estudo semelhante ao de Fernandez et al (2013), porém, com 11 anos de antecedência e duas diferenças significativas: compararam três modelos (HEC-RAS 1D, LISFLOOD-FO 1D-2D e TELEMAC-2D) e utilizaram para calibração e validação dados hidrométricos e imagens de satélite de eventos que causaram inundações. O modelo TELEMAC-2D resolve as equações 2D de águas rasas ou de Saint-Venant com o método de Galerkin sobre uma malha de elementos finitos triangulares (HORRITT; BATES, 2002).

As imagens de satélite utilizadas para a calibração são dos eventos de 30 de outubro de 1998 e 11 de novembro de 2000. Ambas as imagens abrangem a área de estudo representada por 60 km do rio Severn, no Reino Unido. Os tempos médios da passagem dos dois eventos foram respectivamente, 25,52 h e 24 h.

Para a calibração e validação dos três modelos o coeficiente de rugosidade foi limitado em valores diferentes para o canal e para a planície de inundação. Os diferentes processos de cada modelo fazem com que os coeficientes de atrito não possam ser absolutamente comparados. No modelo 1D o termo de fricção é responsável pela perda de energia devido as variações do plano, enquanto para um modelo de elementos finitos 2D, as perdas são representadas diretamente na geometria do domínio na escala do elemento (HORRITT; BATES, 2002).

Horritt e Bates (2002) utilizaram a medida de ajuste F para comparar e medir o desempenho as áreas inundadas geradas por cada modelo.

$$F = \frac{Num(S_{mod} \cap S_{obs})}{Num(S_{mod} \cup S_{obs})} \times 100 \quad (7)$$

onde S_{mod} é o conjunto de pixel, elemento ou célula previsto como inundado pelo modelo, e S_{obs} é p conjunto de pixel observado como inundado na imagem de satélite. *Num* indica o número de membros do conjunto. F varia entre 0 quando não há sobreposição de áreas inundadas modelada e observada, e 100 para um resultado onde elas coincidem completamente.

O desempenho dos modelos foi avaliado comparando a calibração com os dados hidrométricos dos eventos de inundação, com a validação dos mesmos eventos que comparou a previsão das áreas inundadas com as observadas nas imagens de satélites.

Os resultados apresentados por (HORRITT; BATES, 2002) mostram que o modelo HEC-RAS pode ser calibrado com dados hidrométricos e ser usado para prever áreas inundadas mesmo quando os níveis d'água extravasam a calha principal e atingem as planícies de inundação representadas por um MDE. O HEC-RAS e o TELEMAC-2D tiveram níveis semelhantes de desempenho, apesar das diferenças de dimensionalidades. O modelo HEC-RAS 1D apresentou resultados tão bons quanto os das sofisticadas abordagens 2DH dos modelos TELEMAC-2d e LISFLOOD-FP. Os autores (Horritt e Bates) ressaltaram que a metodologia utilizada possui algumas características que tendem a prejudicar os modelos 2DH, pois estes podem usar uma parametrização de fricção mais distribuída, o que pode melhorar os resultados, embora isso possa tornar o processo de calibração mais complexo. Em situações com o escoamento bem caracterizados e complexos nas várzeas, a abordagem 2DH prova ser mais eficaz que a 1D.

Machado (2018) apresentou um artigo que compara resultados de simulações bidimensionais referentes a retro análise do evento de ruptura da barragem de rejeitos do Fundão, localizada no sudeste do Brasil. A maioria dos modelos é capaz de modelar o fluxo newtoniano, apenas alguns são capazes de simular o escoamento não newtoniano. Desta forma, torna-se importante avaliar o desempenho dos modelos

e avaliar o ganho efetivo com as simulação em condições de escoamento não newtoniano (MACHADO; SALIBA; BAPTISTA, 2018).

Os desempenhos das simulações hidráulicas realizadas com os modelos HEC-RAS 5.0.1 (1D e 2D) e FLO-2D PRO foram avaliados por meio da comparação entre a mancha real (área inundada real) e as manchas resultantes das simuladas. Foram realizadas duas análises: comparação binária pixel-a-pixel e a análise “falso positivo e falso negativo”. A mancha de inundação real, efetivamente observada decorrente da ruptura, foi reconstituída a partir a imagem de altíssima precisão, proveniente do satélite ARYA com células de 5 cm, disponibilizada pelo Ministério Público de Minas Gerais, obtida no dia 06/11/2015, imediatamente após a ruptura da barragem de Fundão. Segundo (MACHADO; SALIBA; BAPTISTA, 2018) os resultados dos dois modelos apontam desempenhos bastantes similares, evidenciando que a utilização de modelos mais completos implica em aumento dos esforços e tempos computacionais.

O uso de imagens de satélite com o registro de observação de áreas inundadas em eventos críticos, pode ser uma ferramenta útil também na verificação da qualidade dos dados dos Modelos Digitais de Elevação, quando são comparados os resultados de simulações de um mesmo modelo hidráulico, porém sobre MDEs diferentes. Como já descrito anteriormente, Duarte *et al.* (2018) apresentou um estudo que compara o desempenho de dois modelos digitais de elevação diferentes, um de superfície e um de terreno, com resultados de simulações unidimensionais para a cascata do rio Paranapanema, localizado na divisa dos Estados de São Paulo e Paraná.

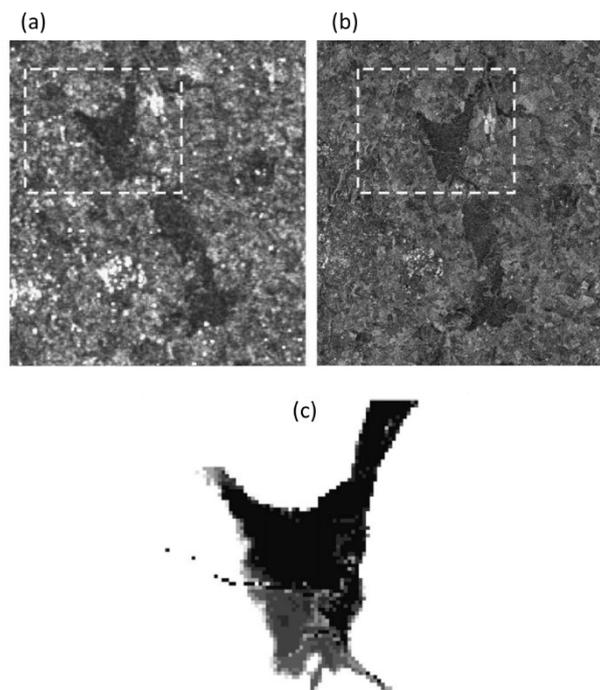
3.6 Calibração e avaliação de desempenho de modelos hidráulicos com dados observados de imagens de satélite

Segundo Shumann *et al.* (2009) apud (MACHADO, 2017) usualmente são usados dados observados de um evento para a calibração e/ou validação de modelos hidráulicos. Estes dados observados podem ser aplicados com diferentes finalidades, como verificação de pontos de melhoria de modelos, determinação de acurácia e a comparação entre diferentes modelos.

Imagens de sensoriamento remoto provou ser indispensável no mapeamento da extensão de inundação para a calibração e validação de modelos hidráulicos (HORRITT, 2006).

Segundo Di Baldassarre, Schumann *et al.* (2009) o uso de mapas binários úmidos/secos gerados a partir de uma imagem de satélite deve ser substituído por uma mapa de inundação observada originado a partir de mais de uma imagem de satélite e por mais de uma metodologia de identificação da inundação. Di Baldassarre, Schumann geraram 10 mapas de inundação de uma mesma cheia observada em duas imagens de satélite com resoluções diferentes. Para cada uma destas imagens foram utilizados 5 técnicas de delimitação da área inundada. Para a calibração do modelo, foi utilizado uma informação de cheia observada derivada da combinação dos 10 mapas por meio de atribuição de um peso para cada mapa. A Figura 12 apresenta as duas imagens de satélite utilizadas para a geração dos 10 mapas, e o resultado da combinação (cheia observada). Na conclusão consideraram que esta metodologia é mais confiável do que as técnicas de calibração padrão que não levam em conta as incertezas na observação da extensão da inundação.

Figura 12 – (a) Imagem de satélite ENVISAT ASAR (75 m de resolução), (b) Imagem de satélite ERS-2 SAR (12,5 m de resolução); (c) cheia observada derivada da combinação dos 10 mapas.



Salienta-se que na falta de mais de uma imagem de satélite para uma mesma cheia, a calibração com mapas binários, mesmo que se conheça as incertezas intrínsecas da identificação da inundação observada, pode apresentar vantagens em relação ao método usual que se apóia em pontos de informações de nível e vazão observados nos rios.

Machado (2017) apresentou um estudo de retro análise da propagação decorrente da ruptura da barragem do Fundão com modelos numéricos 1D e 2D, no qual foi realizado a avaliação do desempenho destes modelos por meio da comparação dos resultados da mancha de inundação calculada com a inundação observada. Para isso foi utilizado a análise pixel-a-pixel denominada comparação binária. Outro fator para avaliação do desempenho dos modelos hidráulicos foi desenvolvido por (MACHADO, 2017), denominado “falso positivo” e o “falso negativo”, onde que para o primeiro considerou-se o cálculo da relação entre o pixel que demonstrou inundação no modelo, embora não tenha sido observado, e o segundo considerou-se o inverso, ou seja, embora o pixel não evidenciasse inundação no modelo, ele foi observado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consiste na identificação das diferenças topográficas de três trechos do rio Paranapanema que divide os estados de São Paulo e Paraná. Estes três vales foram topograficamente caracterizados e posteriormente relacionados com o desempenhos dos modelos 1D e 2DH.

O software de simulação hidrodinâmica 1D e 2D utilizado foi o HEC-RAS 5.0.7 (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (US Army Corps of Engineers).

Os dados de entrada foram extraídos do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado “Desenvolvimento de uma Metodologia de Gestão Integrada de Riscos Associados às Emergências em Barragens”, código ANEEL – 0387-115/2015 (FCTH, 2018).

A comparação dos resultados dos dois modelos foi realizada com as áreas de inundação calculadas, por meio de contabilização do número de pixels das manchas. Esta comparação visa identificar a diferença que uma mancha de inundação calculada pelo modelo 1D tem em relação ao modelo 2DH.

O desempenho dos modelos foi obtido com a comparação das manchas de inundação calculadas com a observada, por meio do confronto dos pixels calculados com os pixels observados. Este método identifica e quantifica os acertos e os erros das manchas de inundação calculadas pelos modelos.

4.1 Caracterização da topografia do vale de jusante

Como informação inicial das características dos vales de jusante das barragens, foram utilizados os dados de declividade e de largura média da calha do canal a jusante das barragens do rio Paranapanema apresentados por (LUCCI; MARTINS; BERNARDINO; JÚNIOR *et al.*, 2018). A Tabela 4-1 apresenta as características das barragens e dos vales de jusante da cascata do rio Paranapanema, com graduação de cor: verde para valores menores e vermelho para maiores.

Tabela 4-1 – Características das barragens e dos vales de jusante da cascata do rio Paranapanema

Nome	UHE Jurumirim	UHE Chavantes	UHE S. Grande	UHE Canoas II
Barragem	concreto e terra	terra	concreto com contrafortes	concreto grav. e terra
Cota do coroamento (m)	570	479	387.17	368
Comprimento da crista (m)	420	500	920	557.5
Descarga máxima (m³/s)	776	1084	1644	1727
Volume NA máximo maximorum (hm³)	7750.68	9539.89	73.98	106
Área no NA máximo maximorum (km²)	488.2	425.11	17.5	18.21
Declividade do canal de jusante (m/m)	0.00055	0.00095	0.00035	0.00055
Largura média da calha de jusante (m)	491	457	650	887
Nome	UHE Canoas I	UHE Capivara	UHE Taquaruçu	UHE Rosana
Barragem	concreto grav. e terra	mista	terra	terra
Cota do coroamento (m)	353	339	287.5	262
Comprimento da crista (m)	507.5	1500	2100	2300
Descarga máxima (m³/s)	1777	2156	2012	2504
Volume NA máximo maximorum (hm³)	228.31	13074.3	990.19	2019.18
Área no NA máximo maximorum (km²)	27.48	693.3	84.26	206.42
Declividade do canal de jusante (m/m)	0.0004	0.0003	0.00025	0.0002
Largura média da calha de jusante (m)	954	1156	2269	534

Fonte: (LUCCI; MARTINS; BERNARDINO; JÚNIOR *et al.*, 2018)

Para a categorização da topografia do vale de cada trecho entre duas UHEs da cascata do rio Paranapanema foi realizado um estudo morfométrico que identifica bacia hidrográfica em duas categorias: quádricas e sinuosas. A equação para categorizar a topografia dos vales é apresentada por Junge (1966) apud (SWAIN, 2018), que relaciona a área da superfície de um lago para cada profundidade por meio da equação (27), a seguir:

$$A(d) = pd^2 + (1 - p)d \quad (8)$$

onde A (d) é a área da superfície na profundidade relativa d; d é determinado pela razão entre a profundidade naquele local específico e a profundidade máxima do

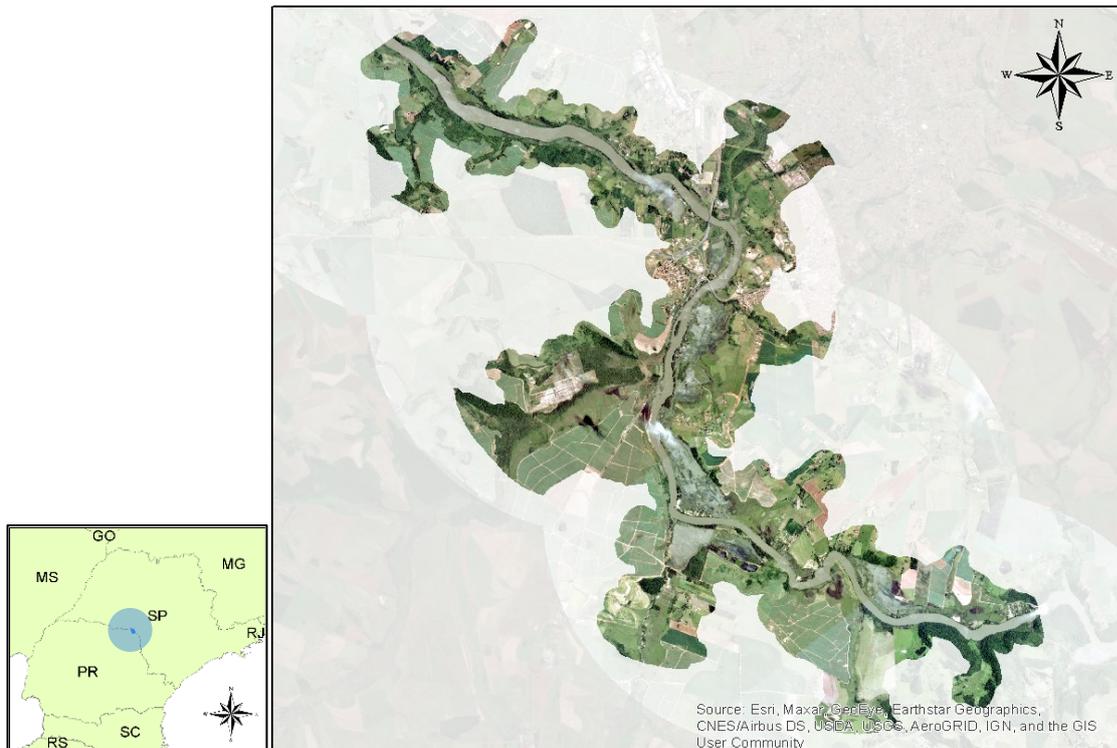
lago; e p é um coeficiente da relação entre a profundidade média e a profundidade máxima, utilizado para categorizar a topografia dos vales.

4.2 Imagens de Satélite

A imagem de satélite utilizada para a identificação da área inundada observada foi disponibilizada pela Planet Labs (MARTA, 2018), para as datas de 18, 21, 23 de janeiro de 2016. As imagens referentes a data do dia 18 de janeiro de 2016 possuem 4 bandas com resolução de 5 m. Já as imagens das datas de 21 e 23 de janeiro de 2016, possuem 4 bandas com resolução de 3 m. A Figura 13 apresenta a imagem de satélite com resolução de 3 m referente a cheia de 2016 para o trecho entre a UHE Ourinhos e a UHE Salto Grande na cascata do rio Paranapanema.

Para a identificação da área inundada foi realizada a classificação da imagem de satélite descrita no item 5.7

Figura 13 – imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 – trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande



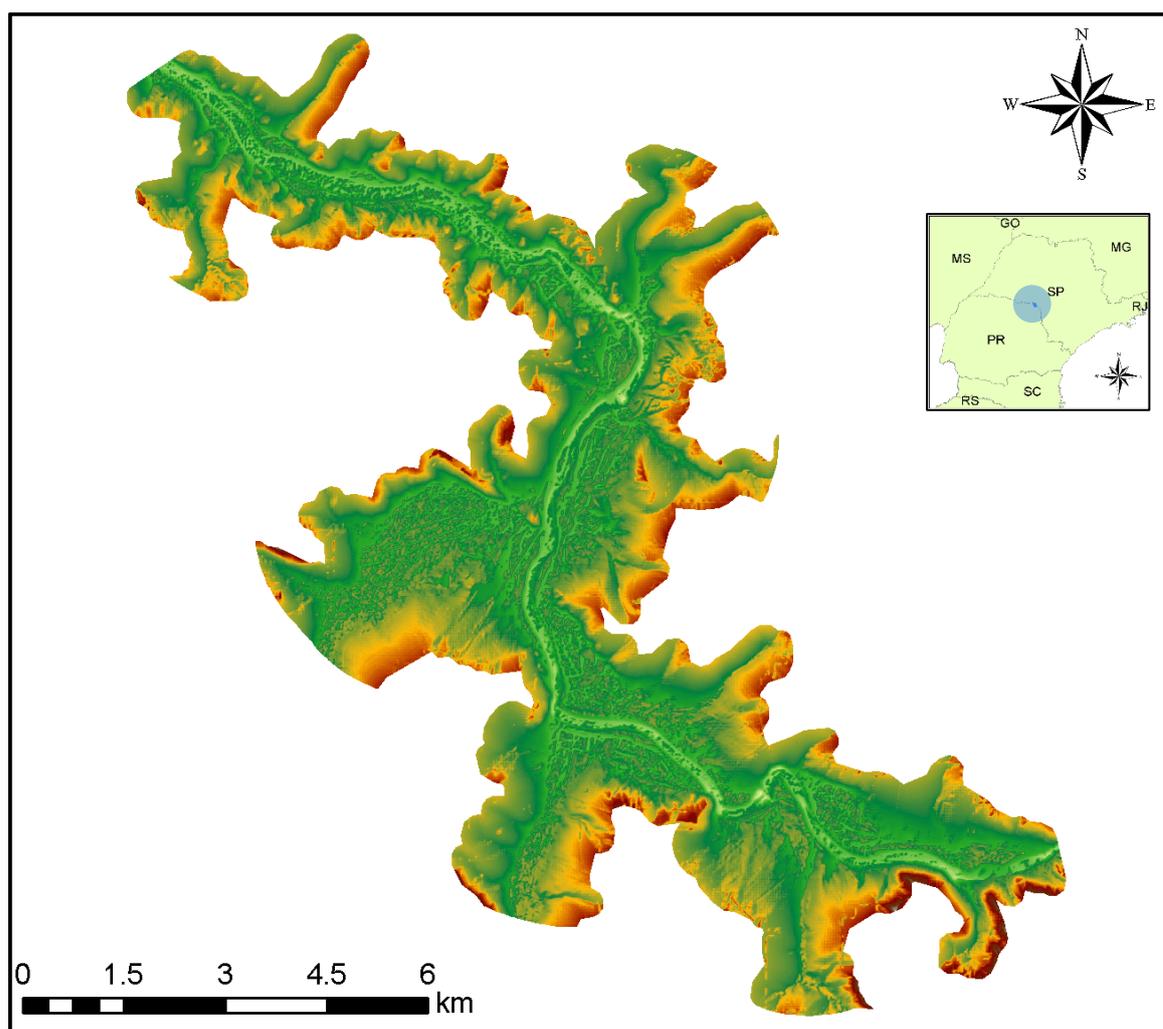
Fonte: Elaborado pelo autor- imagem de satélite Planet Labs 2019

4.3 Modelo Digital de Terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado foi extraído do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado “Desenvolvimento de uma Metodologia de Gestão Integrada de Riscos Associados às Emergências em Barragens”, código ANEEL – 0387-115/2015 (FCTH, 2018).

Este MDT é composto por dados de batimetria dos reservatórios da cascata do Paranapanema e pelo Modelo Digital de Superfície desenvolvido pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitanos (EMPLASA), que para a área de estudo apresenta resolução espacial de 5 metros. A Figura 14 apresenta um exemplo do MDT utilizado para o estudo, do trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande.

Figura 14 – MDT do trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande



Fonte: adaptado de (FCTH, 2018)

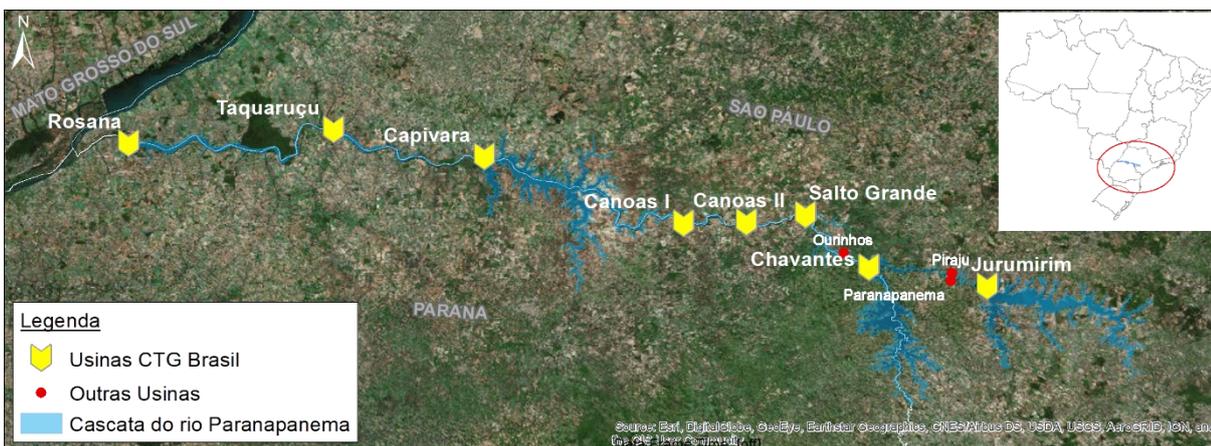
5 DESEMPENHO DOS MODELOS HIDRODINÂMICOS 1D E 2DH PARA ESTIMATIVA DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO

5.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende o trecho do rio Paranapanema entre as Usinas Hidroelétricas Jurumirim e Rosana. O rio Paranapanema está localizado na divisa dos estados de São Paulo e Paraná. Na cascata do rio Paranapanema encontram-se onze usinas hidrelétricas, sendo que oito são operadas pela CTG Brasil.

Foi realizada uma simulação preliminar no trecho entre as barragens Jurumirim e Chavantes, com a condição de contorno de montante referente à operação de Jurumirim da cheia de 1997 ocorrida entre primeiro de janeiro e vinte e oito de fevereiro, e condição de contorno de jusante as regras operacionais da barragem de Chavantes. A Figura 15 apresenta as usinas hidroelétricas da cascata do rio Paranapanema.

Figura 15 – Usinas hidroelétrica da cascata do rio Paranapanema



Fonte: adaptado de (FCTH, 2018)

5.2 Estudo morfométrico

Os vales a jusante de barragens, ou até mesmos trechos de rios apresentam características físicas particulares, como as declividades longitudinais e transversais da várzea. Para parametrizar as diferentes formas físicas dos vales de jusante foi

realizado um estudo morfométrico proposto por Junge (1966) apud (SWAIN, 2018) como apresentado no item 4.

A caracterização do vale de jusante deve ser realizada por meio de um método simples, que possibilite o modelador realizá-la antes da construção da rede nos softwares de simulação hidrodinâmica.

Para parametrizar as características físicas dos vales de jusante o método proposto por Junge (1966) utiliza o a Área para diferentes profundidades. Com apenas duas variáveis o método utilizado se torna simples de ser aplicado.

Para os vales a jusante das barragens de Jurumirim, Paranapanema, Chavantes e Ourinhos foram criados planos inclinados que obedecem a declividade do talvegue para diferentes profundidades. Estes planos foram confrontados com o MDT para a extração da área. Como resultado deste processo obteve-se as áreas para cada profundidade considerada. A Figura 16 apresenta a localização das áreas dos vales de jusante analisados, e as figuras 17, 18, 19 e 20 apresentam respectivamente o detalhe das áreas de Jurumirim, Paranapanema, Chavantes e Ourinhos. Como exemplo, a Figura 21 apresenta os perfis de profundidade em relação ao fundo médio da área do vale de jusante de Jurumirim.

Figura 16 – Áreas dos vales de jusante



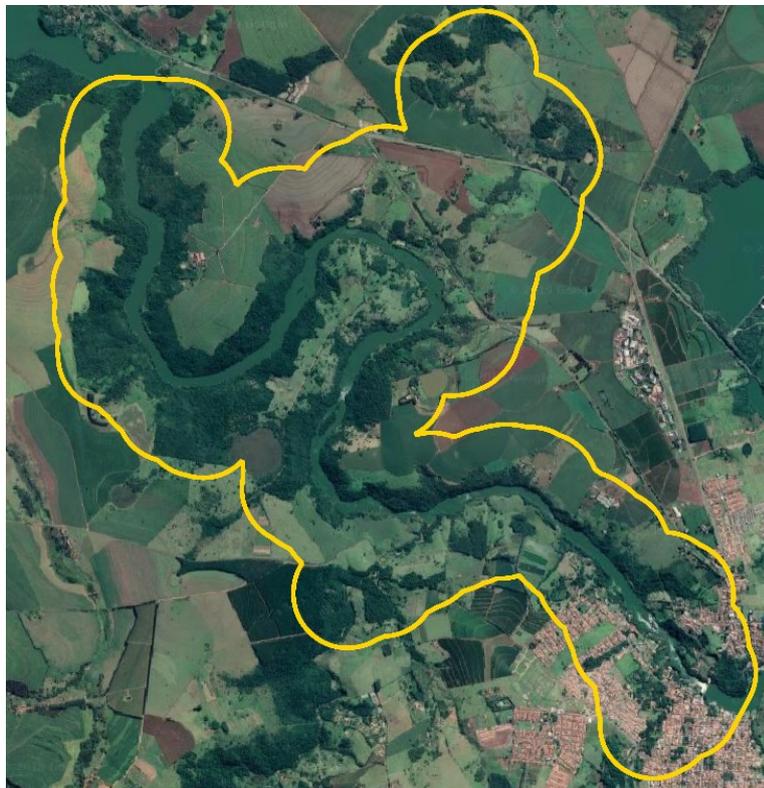
Fonte: o autor

Figura 17 – Vale de jusante de Jurumirim



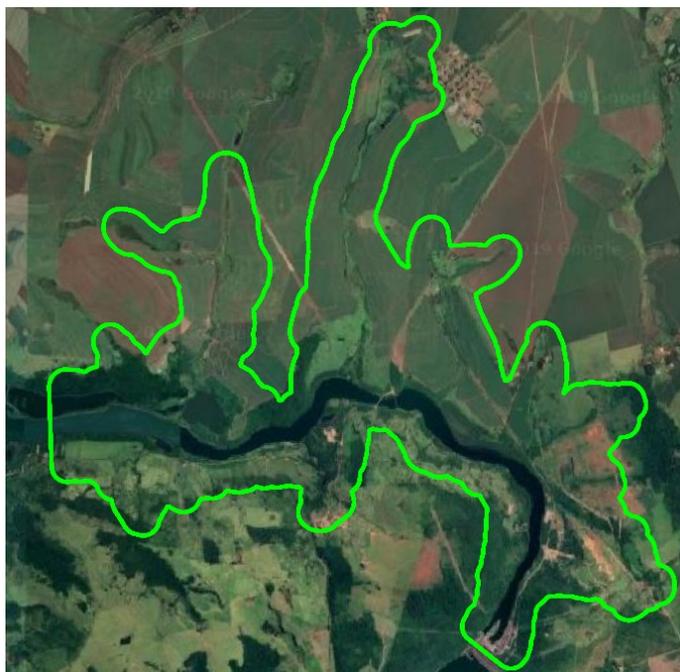
Fonte: o autor

Figura 18 – Vale de jusante de Paranapanema



Fonte: o autor

Figura 19 – Vale de jusante de Chavantes



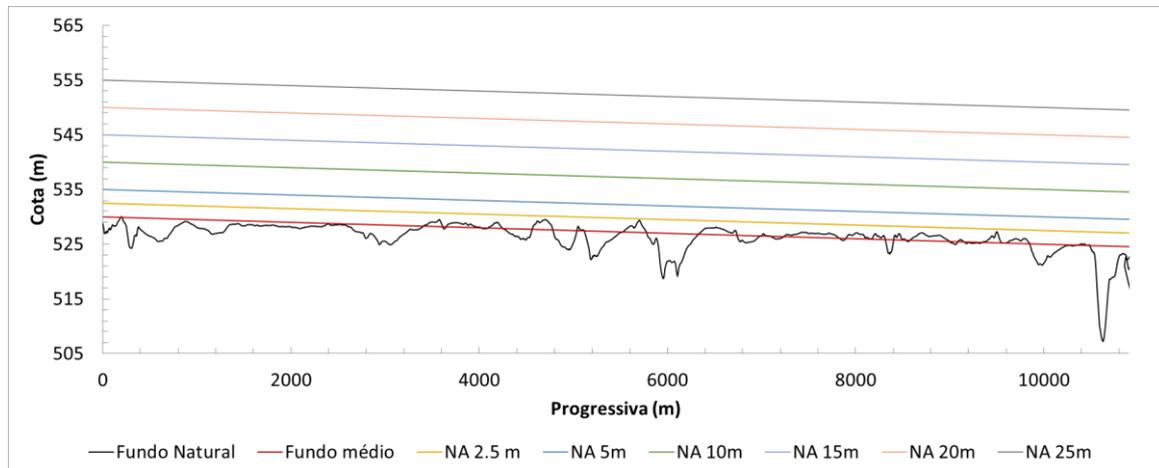
Fonte: o autor

Figura 20 – Vale de jusante de Ourinhos



Fonte: o autor

Figura 21 – Perfil dos NAs em relação ao fundo médio para cada profundidade do vale de jusante de Jurumirim



Fonte: o autor

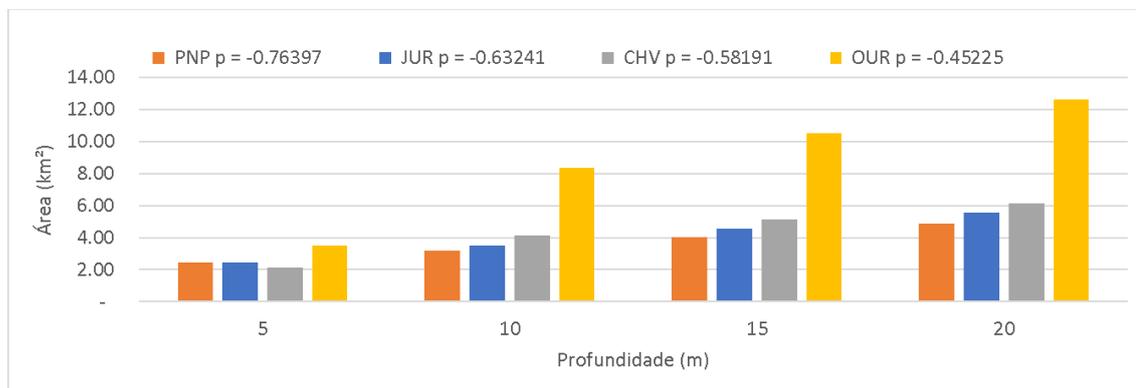
As áreas medidas de cada profundidade extraídas do MDT foram comparadas com as calculadas pela equação (27). O erro que é diferença entre a área medida e a calculada, foi minimizado variando o coeficiente p da equação com o uso da ferramenta *solver* do Microsoft Excel. Como resultado obteve-se o parâmetro p que caracteriza morfologicamente cada vale de jusante. A Tabela 5-1 e a Figura 22 apresentam as áreas inundadas para as respectivas profundidades e o parâmetro “ p ” para cada vale de jusante.

A Tabela 5-2 apresenta o parâmetro morfológico p que caracteriza fisicamente os vales de jusante com as respectivas extensões e declividades médias dos talvegues. A Figura 23 apresenta a relação entre a declividade média do vale e o parâmetro p .

Tabela 5-1 – Profundidades, áreas inundadas dos vales de jusante e parâmetro “ p ”

Profundidade	Área (km ²)			
	JUR	PNP	CHV	OUR
0	-	-	-	-
5	2.93	2.43	2.12	5.57
10	4.26	3.21	4.11	15.10
15	5.47	4.02	5.15	19.16
20	6.61	4.86	6.13	22.67
" p "	-0.6564	-0.7640	-0.5819	-0.4416

Figura 22 – Profundidades, áreas inundadas dos vales de jusante e parâmetro “p”

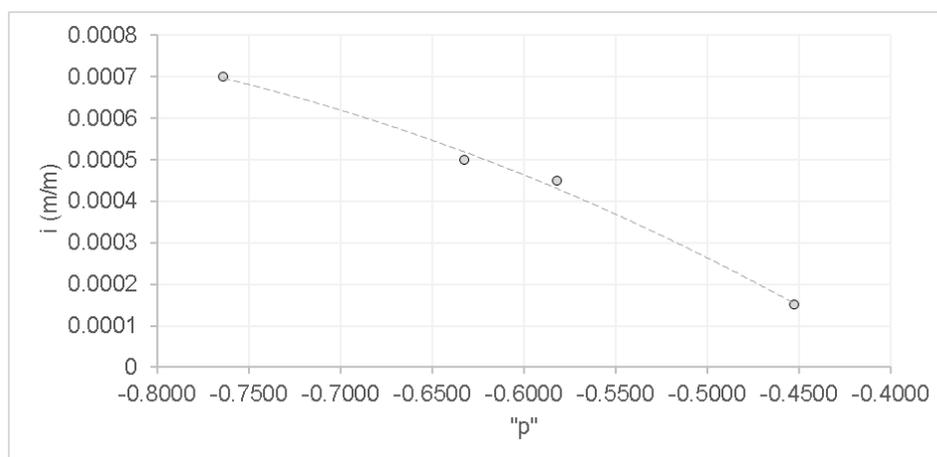


Fonte: o autor

Tabela 5-2 – Parâmetro morfológico p dos vales de jusante

Vale de jusante	declividade(m/m)	Extensão (m)	p
Paranapanema	0.0007	14,000.00	-0.7640
Jurumirim	0.0005	11,000.00	-0.6324
Chavantes	0.00045	9,000.00	-0.5819
Ourinhos	0.00015	10,000.00	-0.4522

Figura 23 – Relação entre a declividade média do vale e o parâmetro p



Fonte: o autor

Com a análise da Figura 23 percebe-se que há um padrão do parâmetro p para as áreas estudadas. Quanto menor a declividade maior é o parâmetro p .

5.3 Simulações Hidrodinâmicas

As simulações hidrodinâmicas foram realizadas para três trechos do rio Paranapanema:

- 1) **JUR-PIR** - entre a UHE Jurumirim e UHE Pirajú, que compreende o vale de jusante de Jurumirim;
- 2) **PNP-CHV** - entre a UHE Paranapanema e UHE Chavantes, que compreende o vale de Paranapanema;
- 3) **CHV-OUR-SGD** - entre a UHE Chavantes e UHE Salto Grande passando pela UHE Ourinho, que compreende os vales de Chavantes e Ourinhos.

Em cada trecho foram realizadas simulações unidimensionais e bidimensionais para três situações diferentes: cheia de 2016 observada, cheia excepcional para período de retorno (TR) de 100 anos e cheia ocasionada por ruptura hipotética da barragem de Jurumirim, totalizando 18 cenários de simulação resumidas na Tabela 5-3.

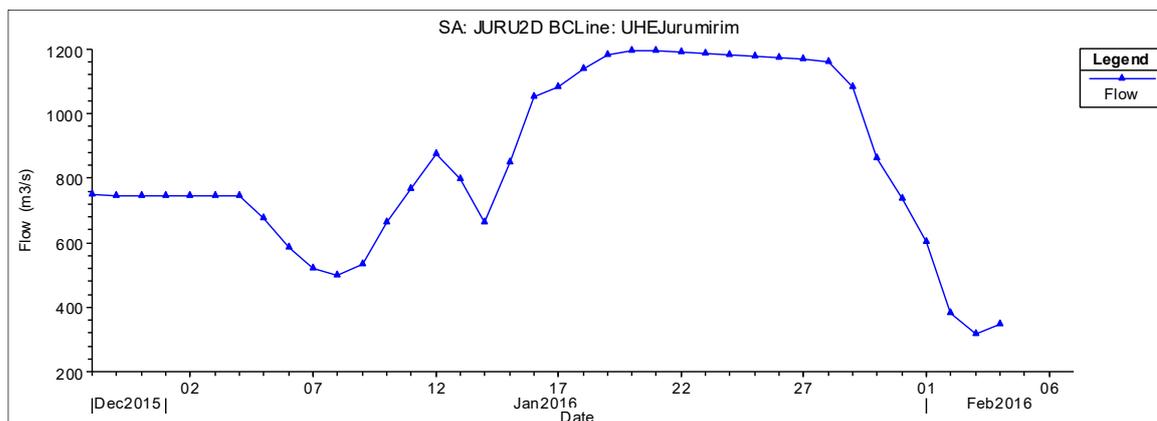
Os parâmetros de ruptura da barragem de concreto da UHE Jurumirim foram: altura máxima da brecha 31,3 m; largura máxima da base da brecha 100 m; taludes da brecha 1H:0,6V; tempo de formação da brecha 0,05 h (FCTH, 2018).

Tabela 5-3 – Cenários de Simulação Hidrodinâmica

Trecho do rio Paranapanema	Tipo de simulação					
	1D			2D		
	forçante de montante			forçante de montante		
	Cheia 2016	TR 100	Ruptura JUR	Cheia 2016	TR 100	Ruptura JUR
JUR-PIR	Cenário 1-1	Cenário 1-2	Cenário 1-3	Cenário 1-4	Cenário 1-5	Cenário 1-6
PNP-CHV	Cenário 2-1	Cenário 2-2	Cenário 2-3	Cenário 2-4	Cenário 2-5	Cenário 2-6
CHV-OUR-SGD	Cenário 3-1	Cenário 3-2	Cenário 3-3	Cenário 3-4	Cenário 3-5	Cenário 3-6

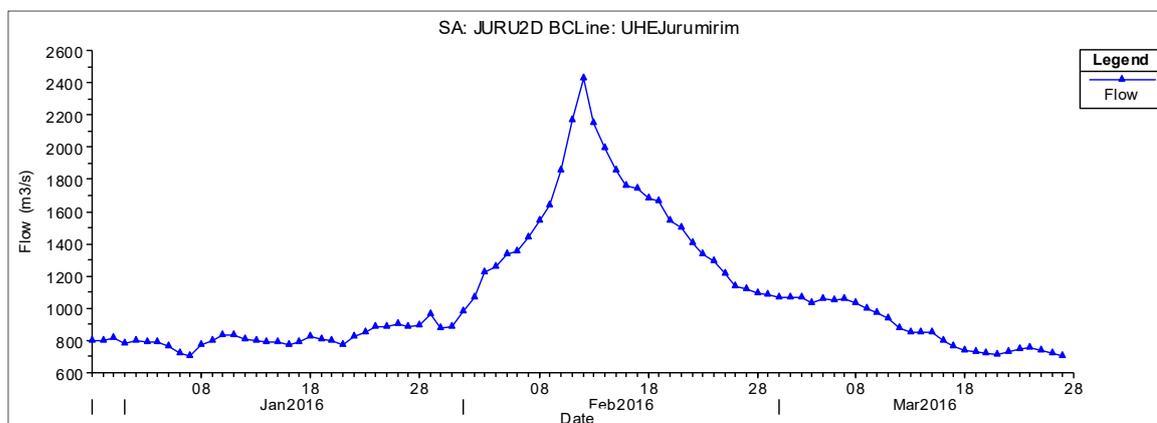
As forçantes de montante são representadas por hidrogramas. Da Figura 24 a Figura 32 são apresentados as três diferentes forçantes de montante para cada trecho.

Figura 24 – Hidrograma da cheia observada de 2016 – Trecho JUR-PIR



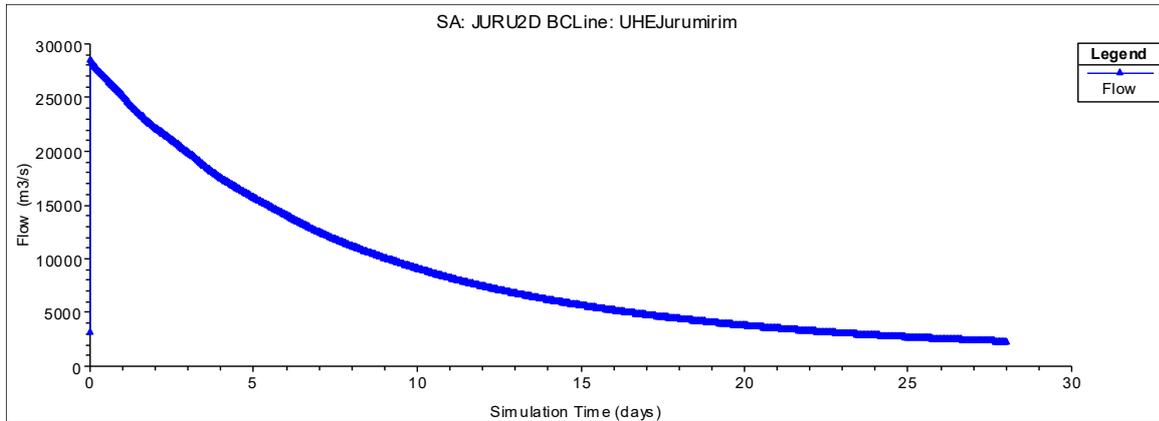
Fonte: o autor

Figura 25 – Hidrograma Excepcional de TR 100 anos - Trecho JUR-PIR



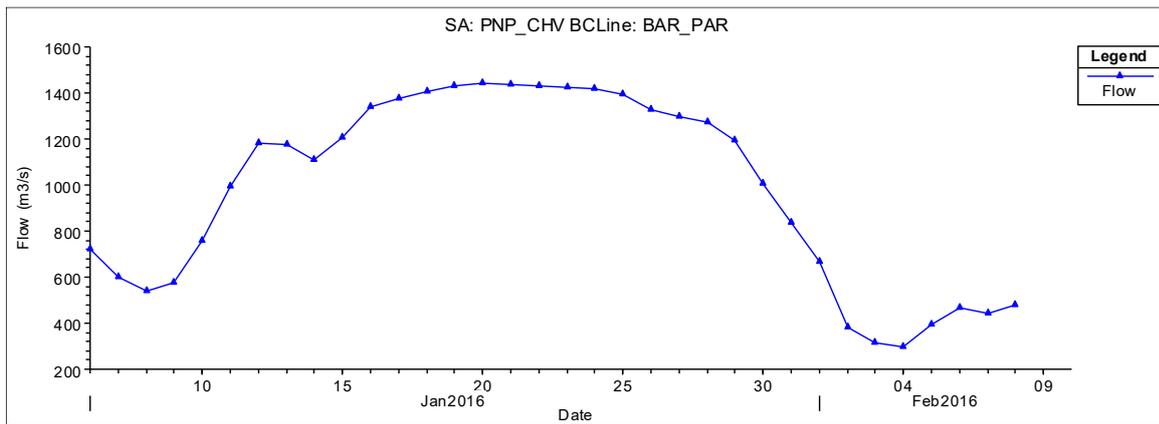
Fonte: o autor

Figura 26 – Hidrograma de ruptura hipotética de Jurumirim - Trecho JUR-PIR



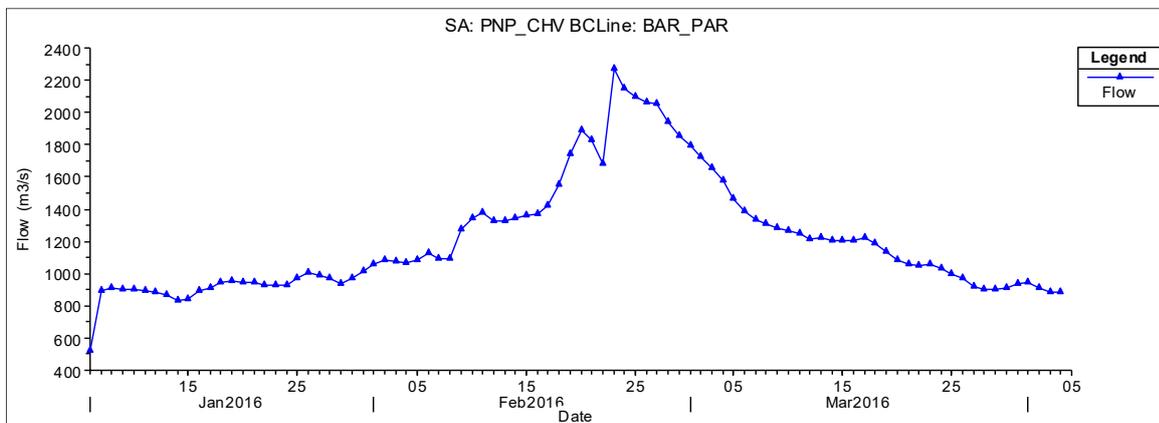
Fonte: o autor

Figura 27 – Hidrograma da cheia observada de 2016 – Trecho PNP-CHV



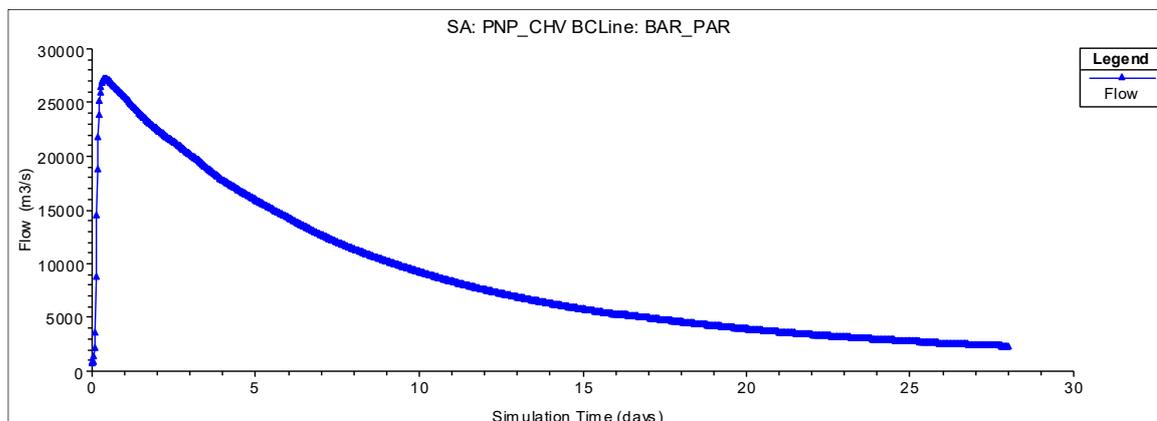
Fonte: o autor

Figura 28 – Hidrograma Excepcional de TR 100 anos - Trecho PNP-CHV



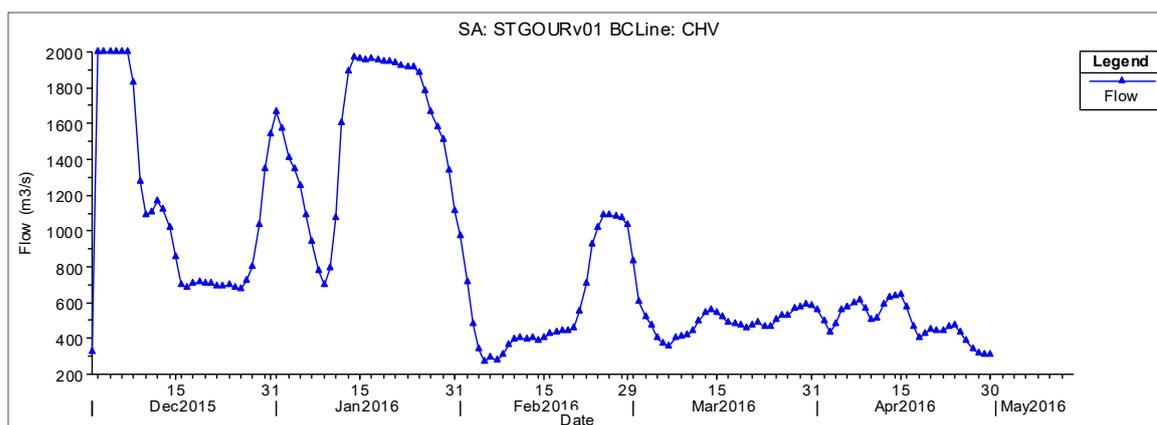
Fonte: o autor

Figura 29 – Hidrograma de ruptura hipotética de Jurumirim - Trecho PNP-CHV



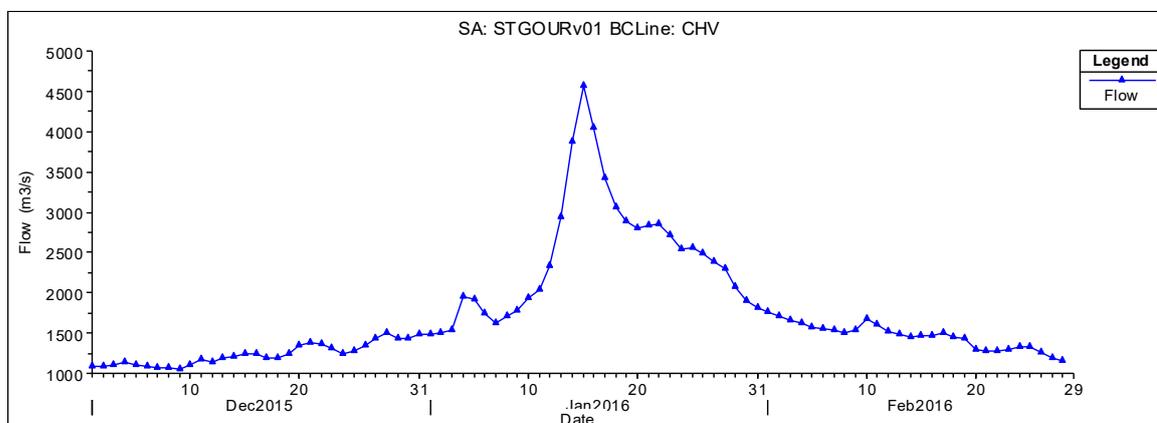
Fonte: o autor

Figura 30 – Hidrograma da cheia observada de 2016 – Trecho CHV-OUR-SGD



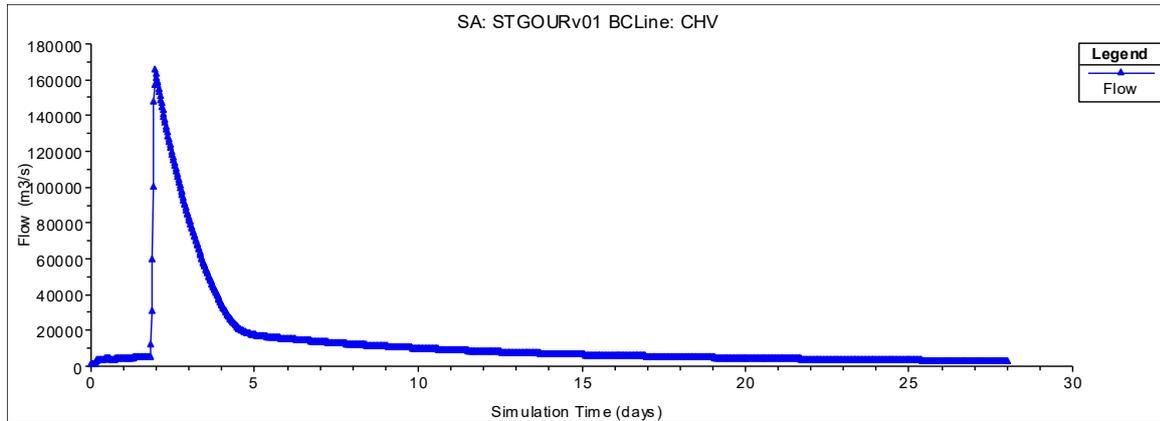
Fonte: o autor

Figura 31 – Hidrograma Excepcional de TR 100 anos - Trecho CHV-OUR-SGD



Fonte: o autor

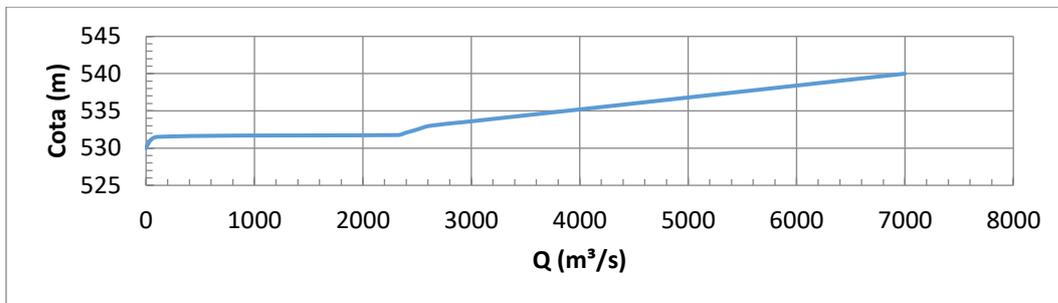
Figura 32 – Hidrograma de ruptura hipotética de Jurumirim - Trecho CHV-OUR-SGD



Fonte: o autor

Para a forçante de jusante foi definida uma curva de descarga que representa de forma generalista a curva de operação da barragem de jusante de cada trecho, ou seja, Piraju, Chavantes, Ourinhos e Salto Grande. Da Figura 33 a Figura 36 estão apresentadas as curvas de descarga (forçantes de jusante) das UHEs Piraju, Chavantes, Ourinhos e Salto Grande.

Figura 33 – Representação da descarga de operação da UHE Piraju



Fonte: o autor

Figura 34 – Representação da descarga de operação da UHE Chavantes

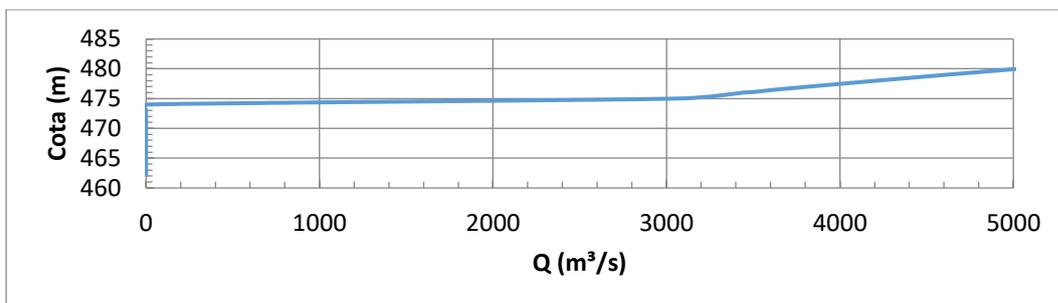
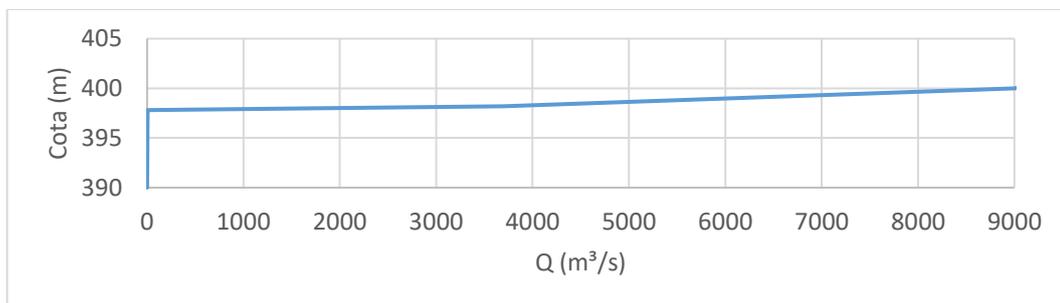
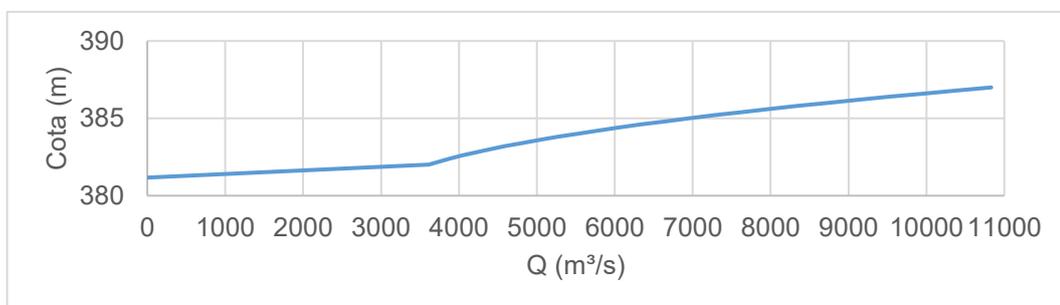


Figura 35 – Representação da descarga de operação da UHE Ourinhos



Fonte: o autor

Figura 36 – Representação da descarga de operação da UHE Salto Grande



Fonte: o autor

5.3.1 Rede de simulação 1D

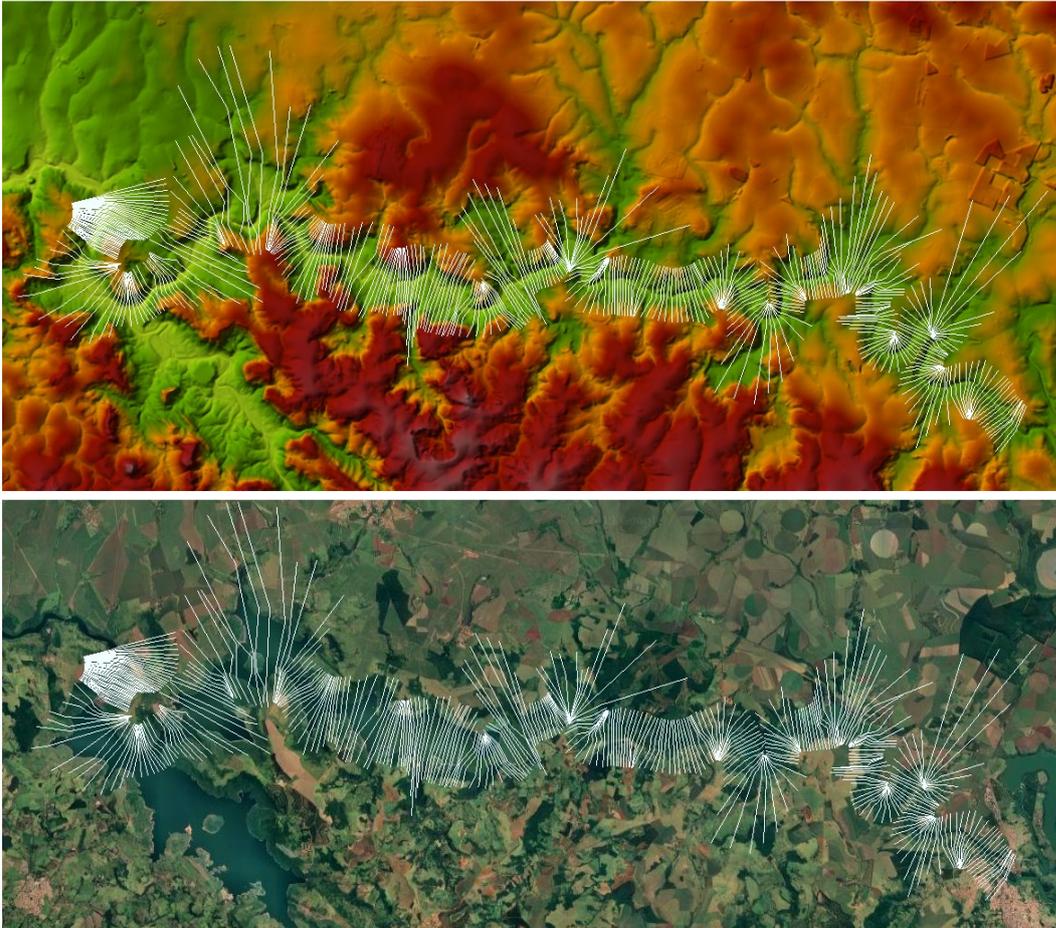
A rede de simulação 1D do trecho JUR-PIR com 35 km de extensão obedeceu a um espaçamento médio de aproximadamente 150m, com um total de 211 seções transversais. A Figura 37 ilustra as seções transversais do trecho JUR-PIR.

Figura 37 – Rede de simulação 1D – Trecho JUR-PIR



O trecho PNP-CHV com 58,5 km de extensão apresenta um espaçamento de 150m com um total de 406 seções transversais. A Figura 38 apresenta as seções transversais do trecho PNP-CHV.

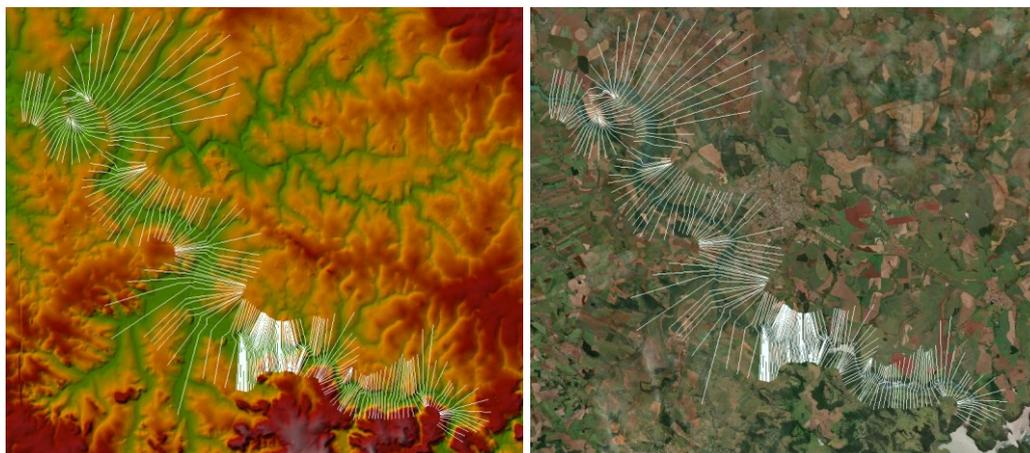
Figura 38 – Rede de simulação 1D – Trecho PNP-CHV



Fonte: o autor

O último trecho estudado, que compreende dois vales de inundações em estudo (jusante de Chavantes e de Ourinhos), possui 126 km de extensão com um espaçamento de médio de 250 m com um total de 245 seções transversais. A Figura 39 apresenta as seções transversais do trecho CHV-OUR-SGD.

Figura 39 – Rede de simulação 1D – Trecho CHV-OUR-SGD

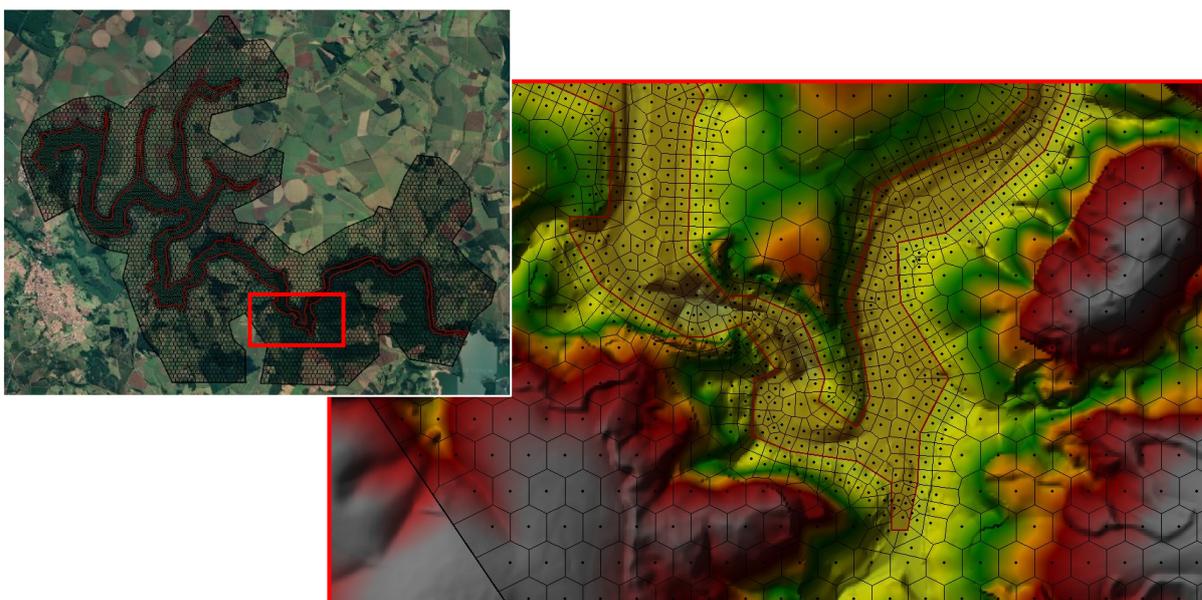


Fonte: o autor

5.3.2 Rede de simulação 2DH

A rede de simulação 2DH do trecho JUR-PIR foi construída com uma malha hexagonal com um refinamento na área da calha do rio delimitada por meio da utilização de “*Break Lines*”, o que possibilitou a utilização de células menores para esta região. A malha 2D do trecho JUR-PIR possui uma área de 119,20 km² representada por 12.170 células hexagonais e irregulares, com um total de 30.671 faces. A Figura 40 apresenta a malha 2D do trecho JUR-PIR.

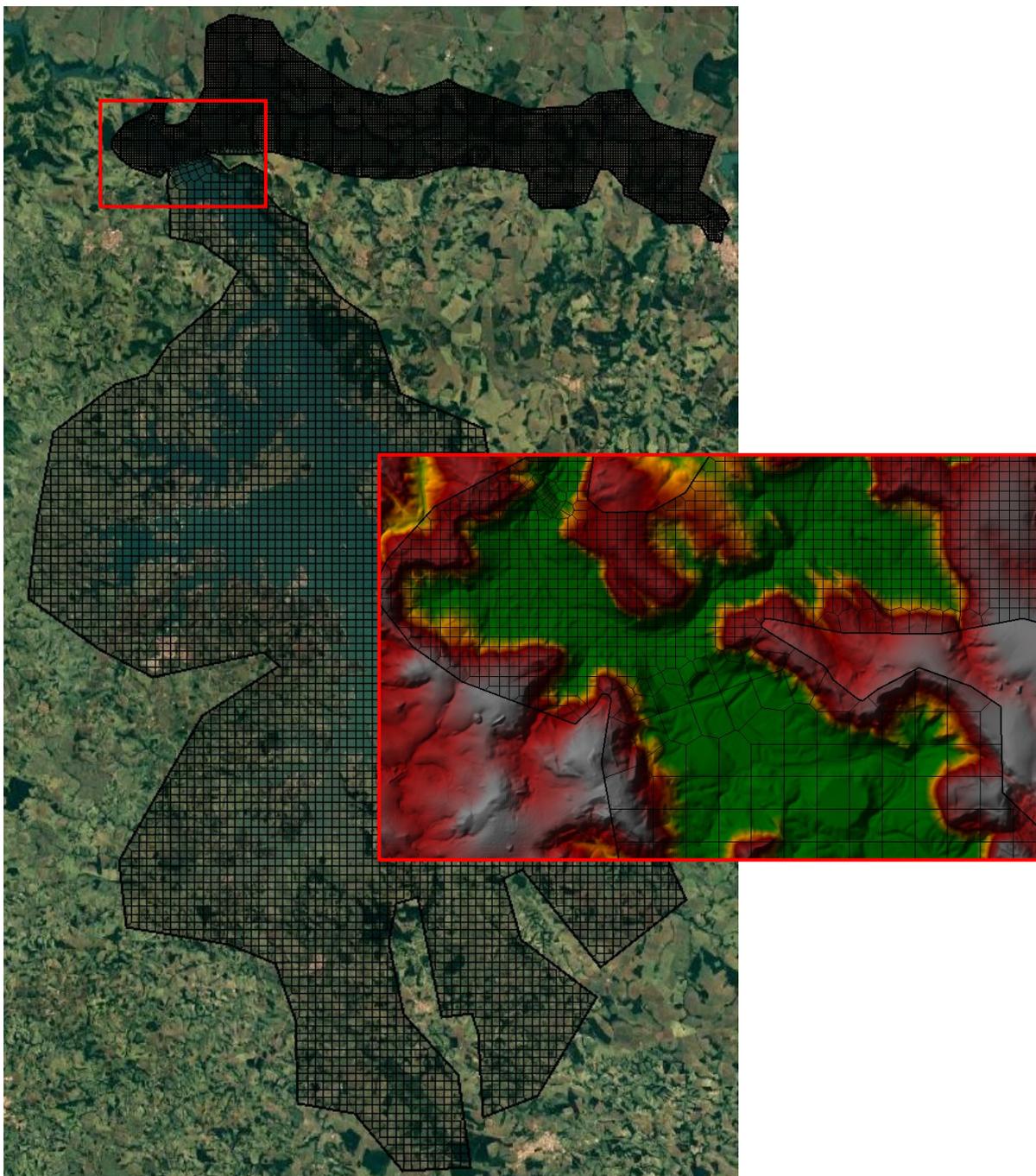
Figura 40 – Rede de simulação 2D – Trecho JUR-PIR



Fonte: o autor

O trecho PNP-CHV foi simulado com uma malha regular quadriculada que abrange uma área de 1.415,64 km², que considera a parcela da área do reservatório de Chavantes no rio Itararé representada por uma malha de 500 x 500 m. O trecho do rio Paranapanema possui uma malha de 150 x 150m. Para este trecho a malha apresenta um total de 15.045 células com 28.808 faces. A Figura 41 apresenta a malha 2D do trecho PNP-CHV.

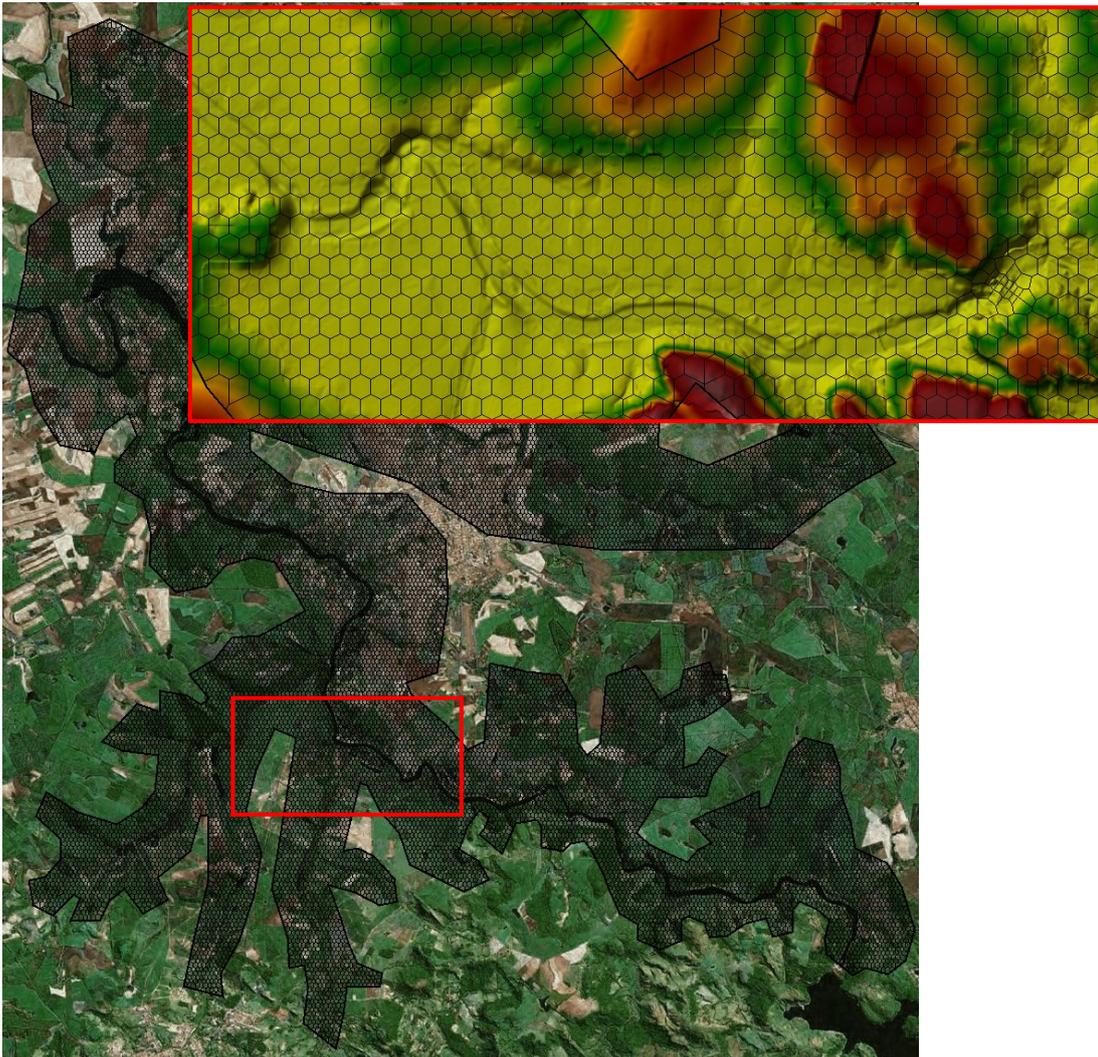
Figura 41 – Rede de simulação 2D – Trecho PNP-CHV



Fonte: o autor

O trecho CHV-OUR-SGD possui uma malha regular hexagonal com uma área de 616,69 km², representada por 28.922 células com 80.734 faces. Esta malha não possui refinamento com alteração de tamanho ou forma das células como a malha do trecho JUR-PIR. A Figura 48 apresenta a malha 2D do trecho CHV-OUR-SGD.

Figura 42 – Rede de simulação 2D – Trecho CHV-OUR-SGD



Fonte: o autor

5.4 Calibração dos modelos 1D e 2DH

Com a calibração de modelos hidrodinâmicos, unidimensionais ou bidimensionais, objetiva-se ajustar o modelo de cálculo de modo que este reproduza as condições observadas em campo utilizadas como referência. Desta forma pode-se representar o comportamento do escoamento modelado de forma fidedigna às condições reais (FCTH, 2018) .

A calibração dos modelos, contou com os dados disponíveis de vazões e níveis d'água operacionais das usinas de Jurumirim, Paranapanema e Chavantes para o período compreendido entre 01/12/2015 e 30/04/2016. Para o mesmo período

também foram utilizados para a calibração os dados do posto fluviométrico código ANA 64220050, localizado à aproximadamente 1.200 km da UHE Paranapanema.

O processo de calibração do modelo foi realizado por meio do método de tentativas e erros, de forma a se determinar os parâmetros hidráulicos, em particular os valores de rugosidade de Manning, em função da cota do nível d'água que representasse o escoamento nos trechos do rio Paranapanema estudados no presente trabalho, e baseou-se na comparação entre as curvas cota-descarga das seções imediatamente a jusante de cada usina de cada trecho (Jurumirim, Paranapanema-posto fluviométrico ANA e Chavantes) (FCTH, 2002; 2009; 2018).

Após a calibração dos modelos, os primeiros resultados das simulações 1D e 2D apresentaram uma discrepância significativa, o que fez com que fosse revisto a montagem das redes de simulação. Constatou-se que alguns trechos da rede 1D gerados automaticamente por meio da ferramenta de interpolação apresentavam seções transversais não ortogonais ao eixo, o que representa erroneamente uma área maior de escoamento. Estes trechos também não representavam alguns estrangulamentos. Visto isso pode-se compreender que a grande diferença entre os primeiros resultados 1D e 2D foi ocasionada pelo modelo 1D.

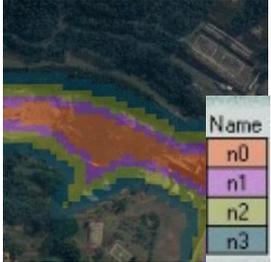
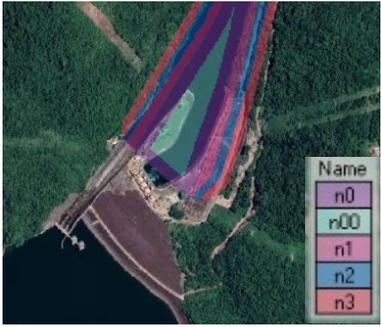
5.4.1 Resultado da calibração dos modelos

A Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam os resultados obtidos na calibração com a comparação entre os dados históricos das curvas cota-descarga das seções à jusante das barragens e os resultados modelos. A Tabela 5-4 e a Tabela 5-5 apresentam os parâmetros hidráulicos obtidos na calibração para os modelos 1D e 2DH.

Tabela 5-4 – Coeficiente de rugosidade de manning do modelo 1D

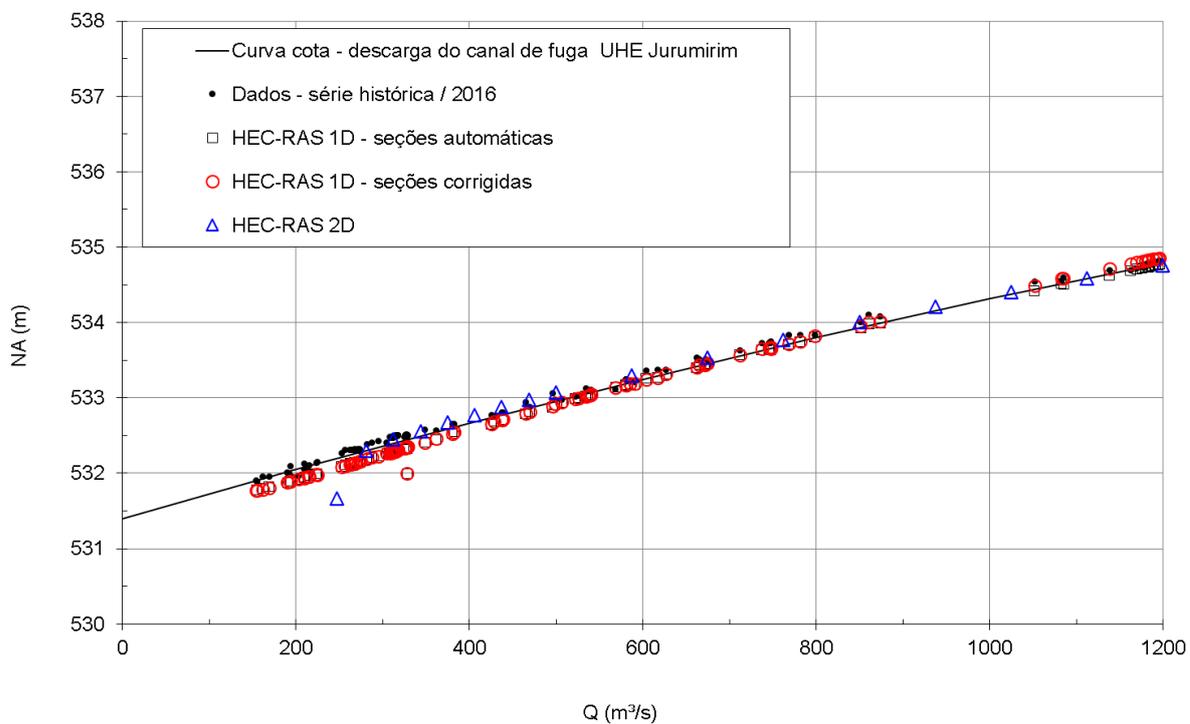
Trecho	Coef. De rugosidade de manning (n)	
	Calha Principal	Várzea
Jurumirim - Piraju	0.045	0.235
Paranapanema - Chavantes	0.075	0.390
Chavantes - Ourinhos - Salto Grande	0.030	0.300

Tabela 5-5 – Coeficiente de rugosidade de manning do modelo 2DH

Trecho	Coef. De rugosidade de manning (n)		Planta das Faixas
	Faixa de n	Valores	
Jurumirim - Piraju	NoData	0.15	
	n0	0.070	
	n1	0.010	
	n2	0.001	
	n3	0.001	
Parapanema - Chavantes	1	0.070	
	2	0.066	
Chavantes - Ourinhos - Salto Grande	NoData	0.085	
	n0	0.046	
	n00	0.020	
	n1	0.001	
	n2	0.001	
	n3	0.001	

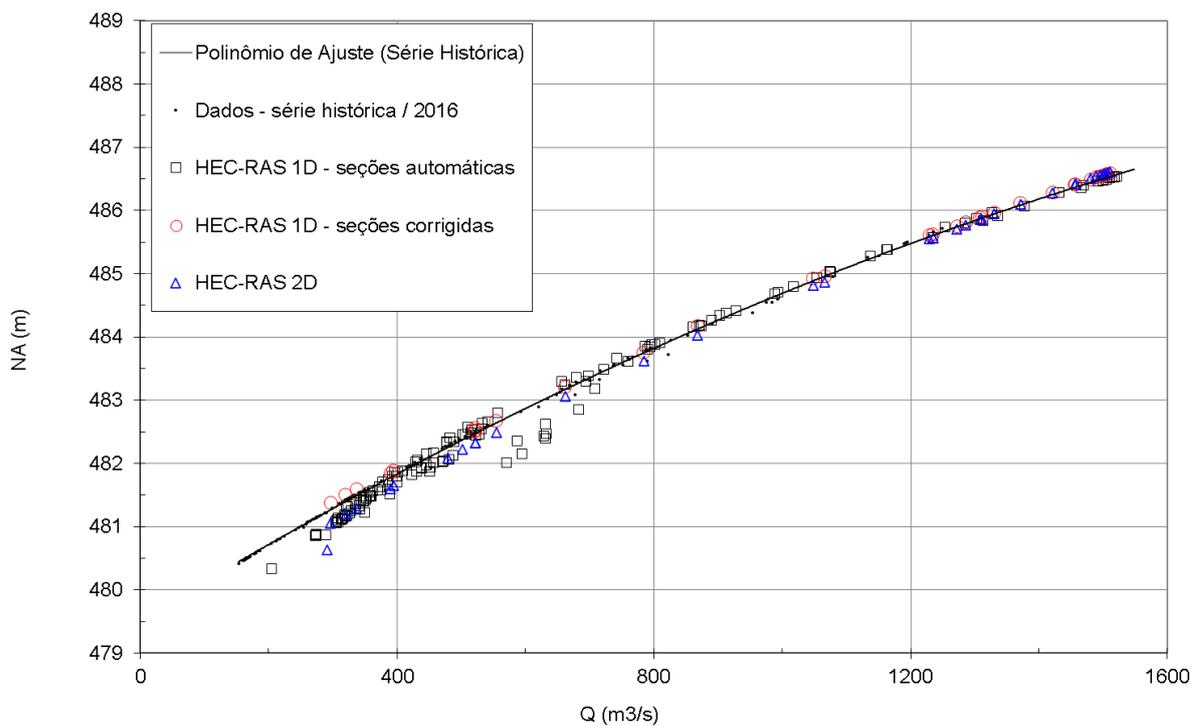
Em todos os casos analisados, o desvio apresentado foi admitido como aceitável para a calibração realizada, uma vez que se o objetivo da aplicação dos parâmetros calibrados é a definição das manchas de inundação oriundas do escoamento de cheias excepcionais e de ruptura de barragem, nos quais as condições do escoamento são muito complexas e as informações disponíveis para a calibração são escassas. A Figura 43, Figura 44 e a Figura 45 apresentam respectivamente o resultado da calibração 1D e 2DH para os trechos JUR-PIR, PNP-CHV e CHV-OUR-SGD.

Figura 43 – Calibração dos modelos 1D e 2DH para o trecho JUR-PIR



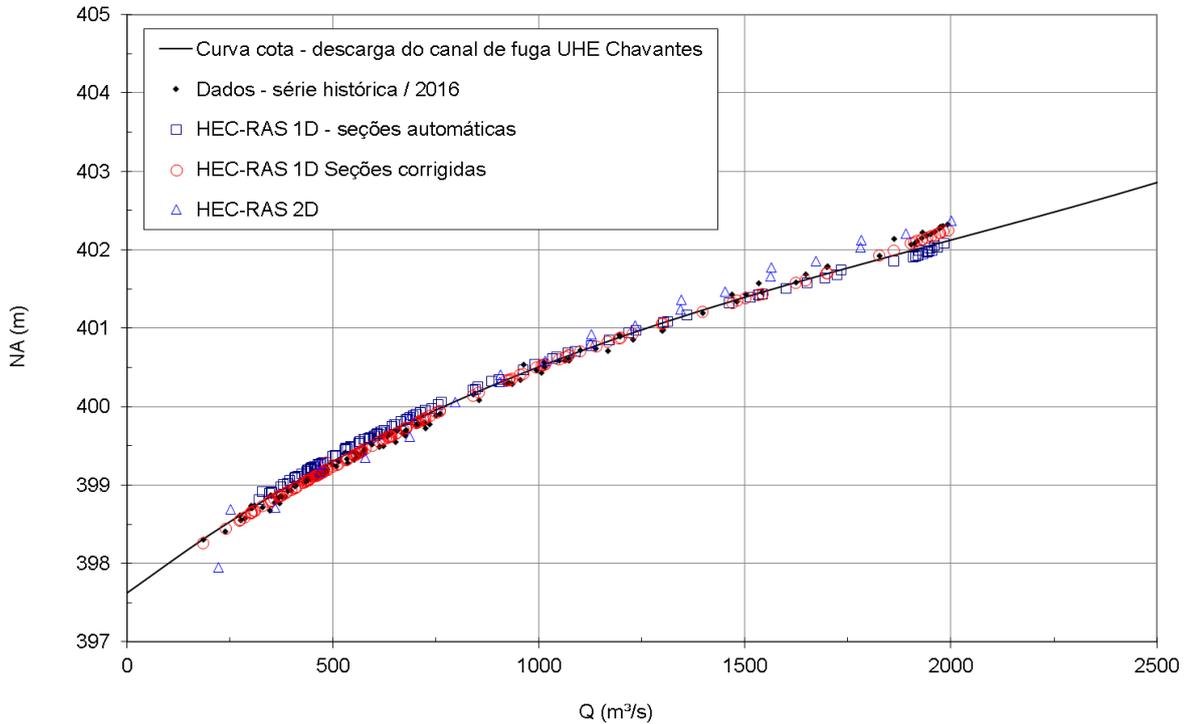
. Fonte: o autor

Figura 44 – Calibração dos modelos 1D e 2DH para o trecho PNP-CHV



Fonte: o autor

Figura 45 – Calibração dos modelos 1D e 2DH para o trecho CHV-OUR-SGD

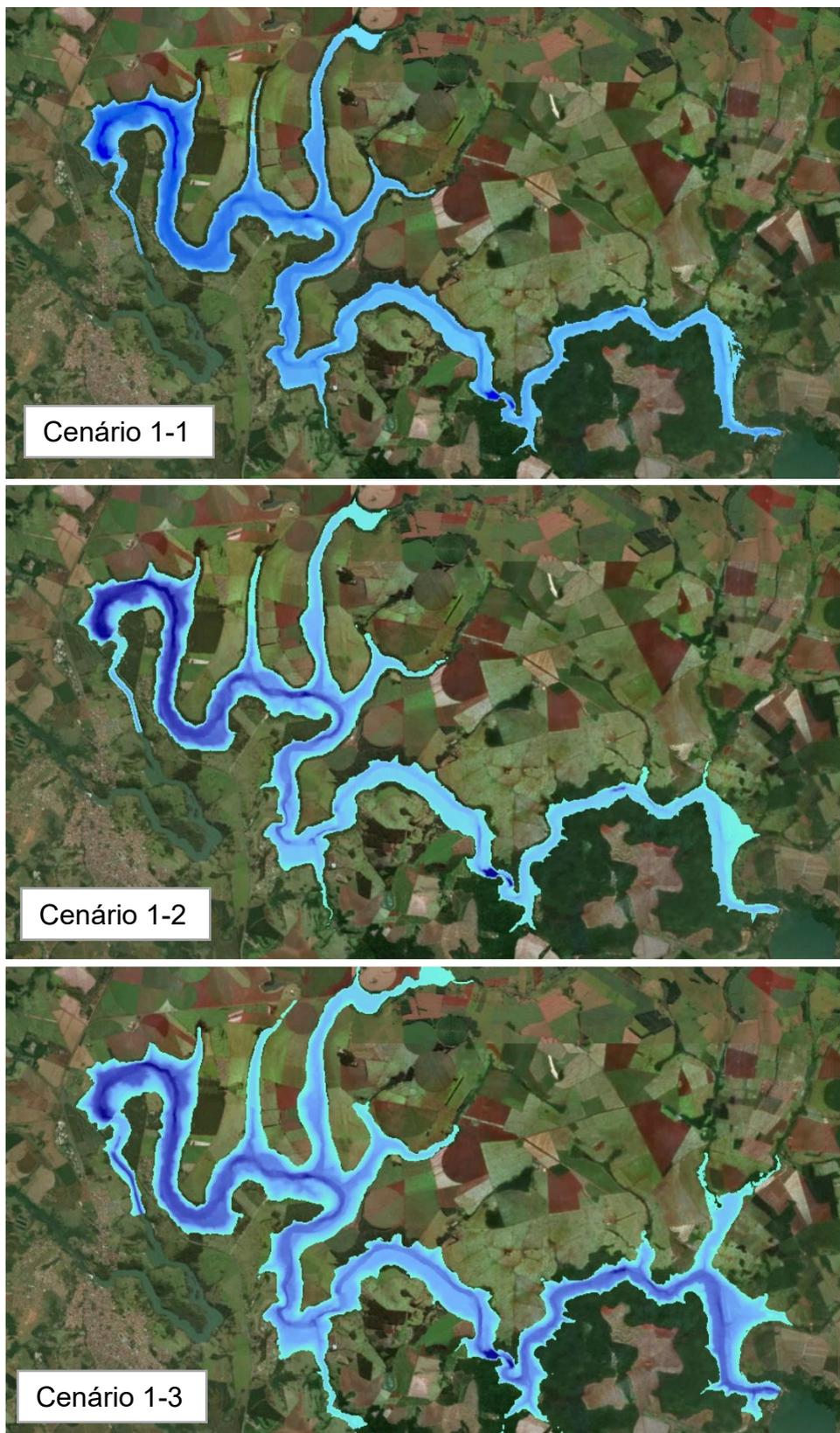


Fonte: o autor

5.5 Resultados das Simulações – manchas de inundação

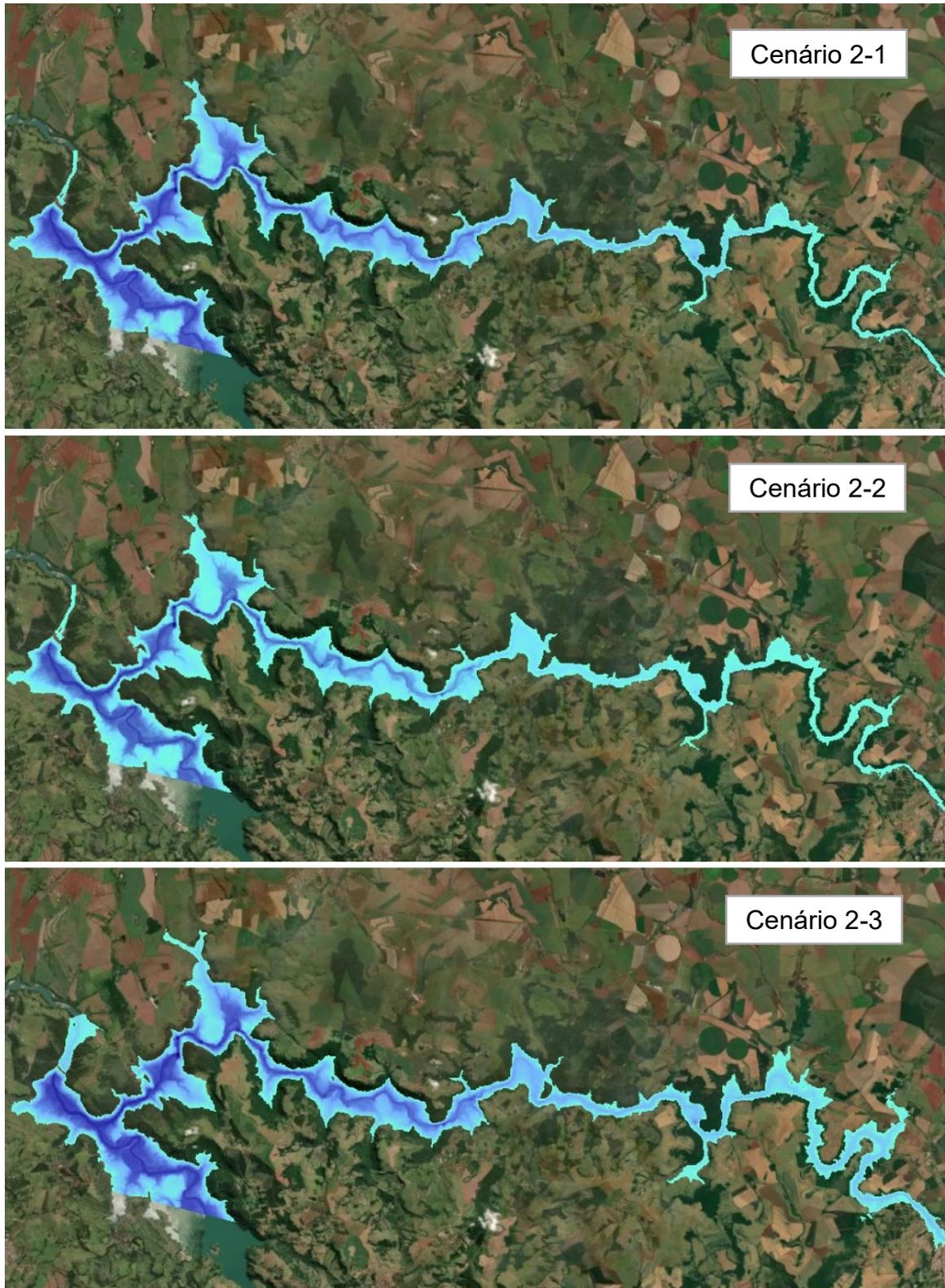
O processamento das manchas de inundação foi realizado com o módulo RAS Mapper do software HEC-RAS 5.0.7. Este módulo utiliza um MDE para gerar o mapa de profundidades com os resultados das simulações hidrodinâmicas, seja 1D ou 2D. Da Figura 46 a Figura 51 são apresentados as manchas de inundações dos resultados das simulações dos cenários definidos na Tabela 5-3.

Figura 46 – Manchas de inundação 1D – JUR-PIR



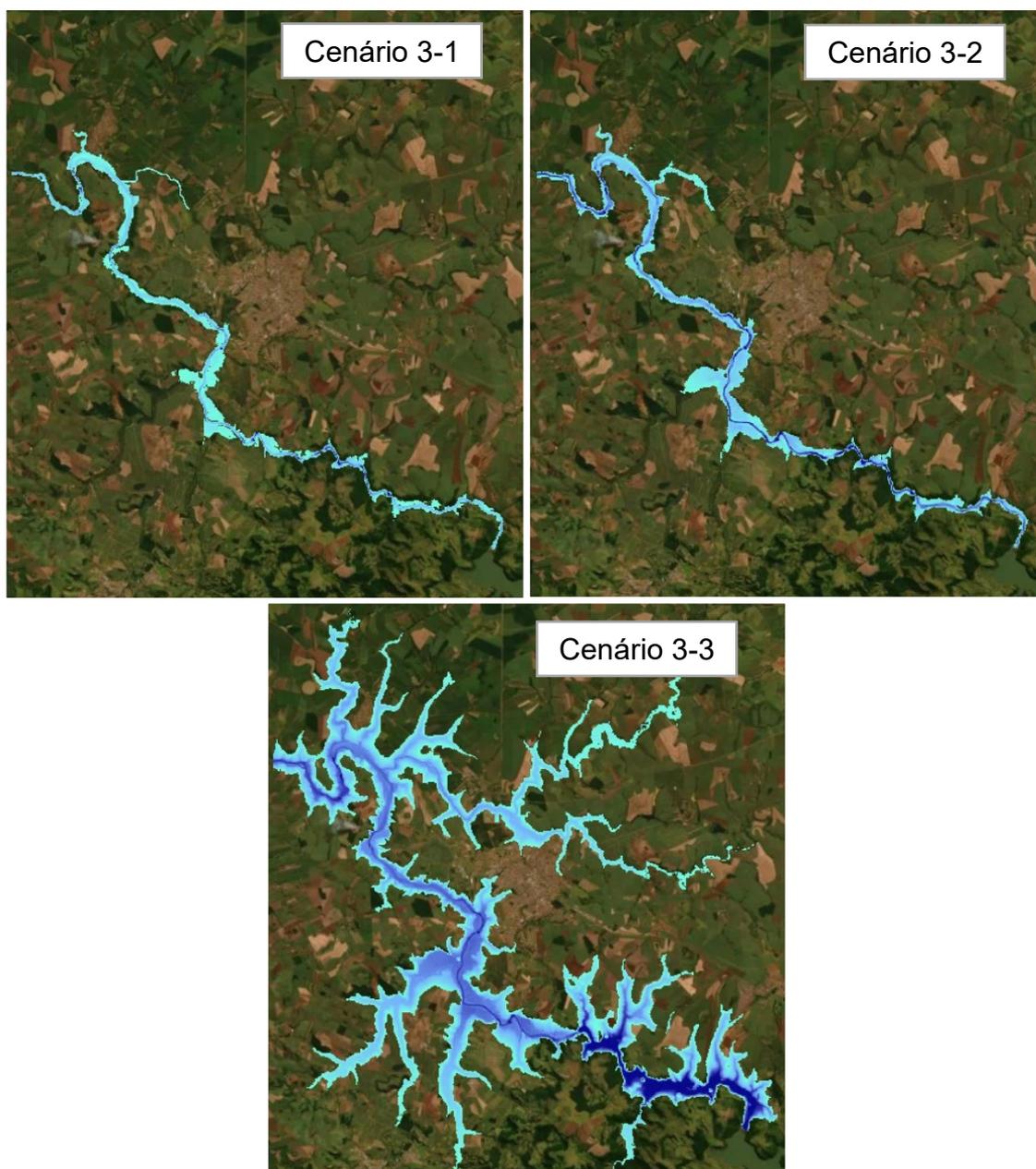
Fonte: o autor

Figura 47 – Manchas de inundação 1D – PNP-CHV



Fonte: o autor

Figura 48 – Manchas de inundação 1D – CHV-OUR-SGD



Fonte: o autor

Figura 49 – Manchas de inundação 2D – JUR-PIR

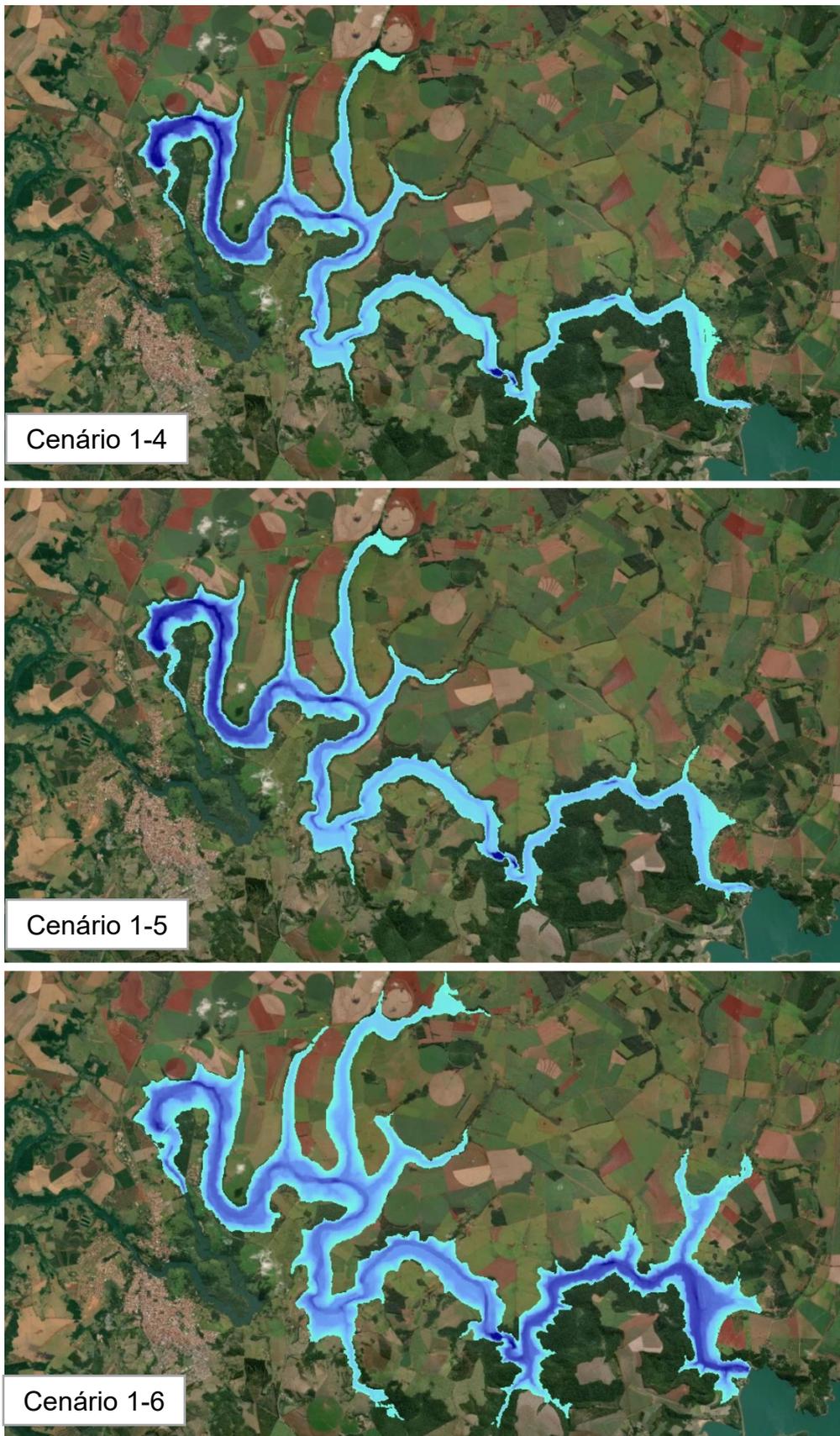


Figura 50 – Manchas de inundação 2D – PNP-CHV

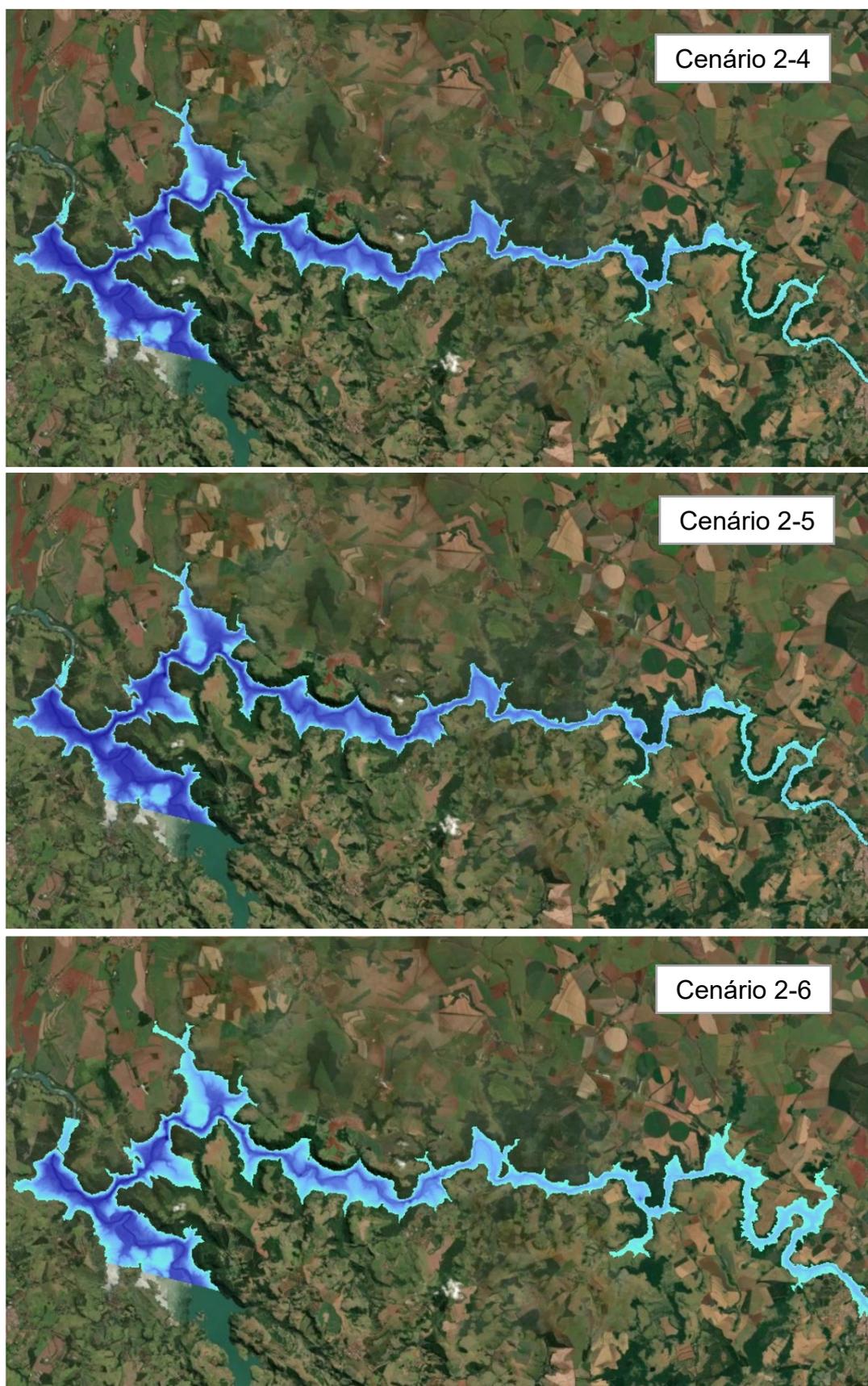
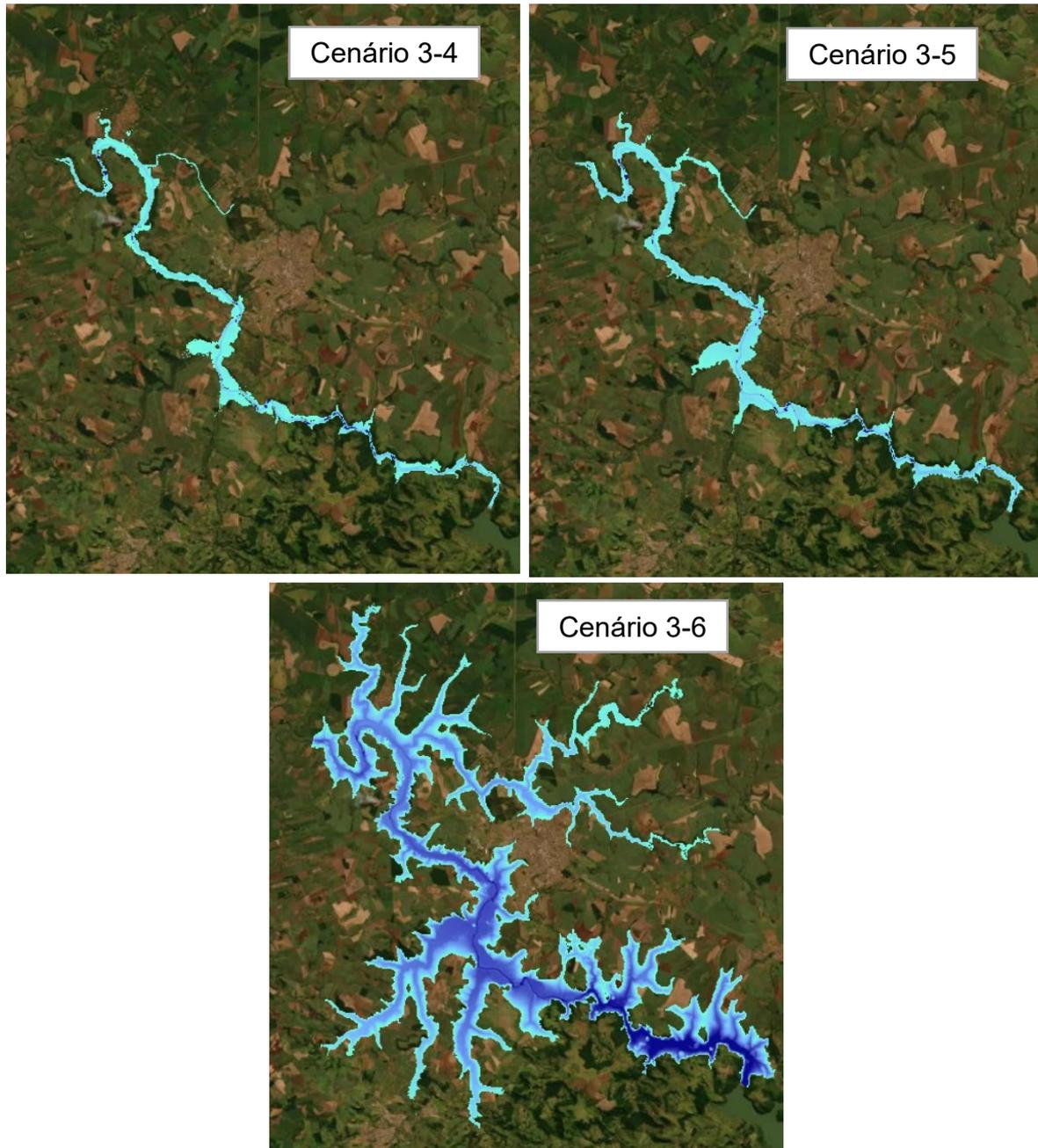


Figura 51 – Manchas de inundação 2D – CHV-OUR-SGD



5.6 Comparação dos resultados das simulações 1D e 2DH

A comparação dos resultados 1D e 2DH foi realizada para o cenário de cheia hipotética de TR 100 anos e o cenário de ruptura hipotética das barragens por meio da contagem dos pixels de inundação que na totalidade representam a área inundada. A comparação dos resultados da cheia ocorrida em 21 de janeiro de 2016 é apresentada no capítulo 5.8 “Avaliação do desempenho dos modelos 1D e 2DH”. A Tabela 5-6 e a Tabela 5-7 apresentam respectivamente a comparação do número de

pixels e área inundada dos resultados dos modelos 1D e 2DH para os cenários de cheia TR 100 anos e ruptura hipotética das barragens.

Tabela 5-6 – Comparação do número de pixels de área inundada dos modelos 1D e 2DH para os cenários de cheia TR 100 e ruptura hipotética das barragens

Modelo	Pixels					
	JUR-PIR	PNP-CHV	CHV-OUR-SGD	JUR-PIR	PNP-CHV	CHV-OUR-SGD
	TR 100	TR 100	TR 100	Ruptura	Ruptura	Ruptura
1D	179512	507341	390579	286610	602996	1801645
2DH	192651	510305	413770	338412	609729	2156981
(2DH/1D)-1	7.32%	0.58%	5.94%	18.07%	1.12%	19.72%

Tabela 5-7 – Comparação da área inundada dos modelos 1D e 2DH para os cenários de cheia TR 100 e ruptura hipotética das barragens

Modelo	Área inundada (km ²)					
	JUR-PIR	PNP-CHV	CHV-OUR-SGD	JUR-PIR	PNP-CHV	CHV-OUR-SGD
	TR 100	TR 100	TR 100	Ruptura	Ruptura	Ruptura
1D	17.95	50.73	39.06	28.66	60.30	180.16
2DH	19.27	51.03	41.38	33.84	60.97	215.70
(2DH/1D)-1	7.32%	0.58%	5.94%	18.07%	1.12%	19.72%

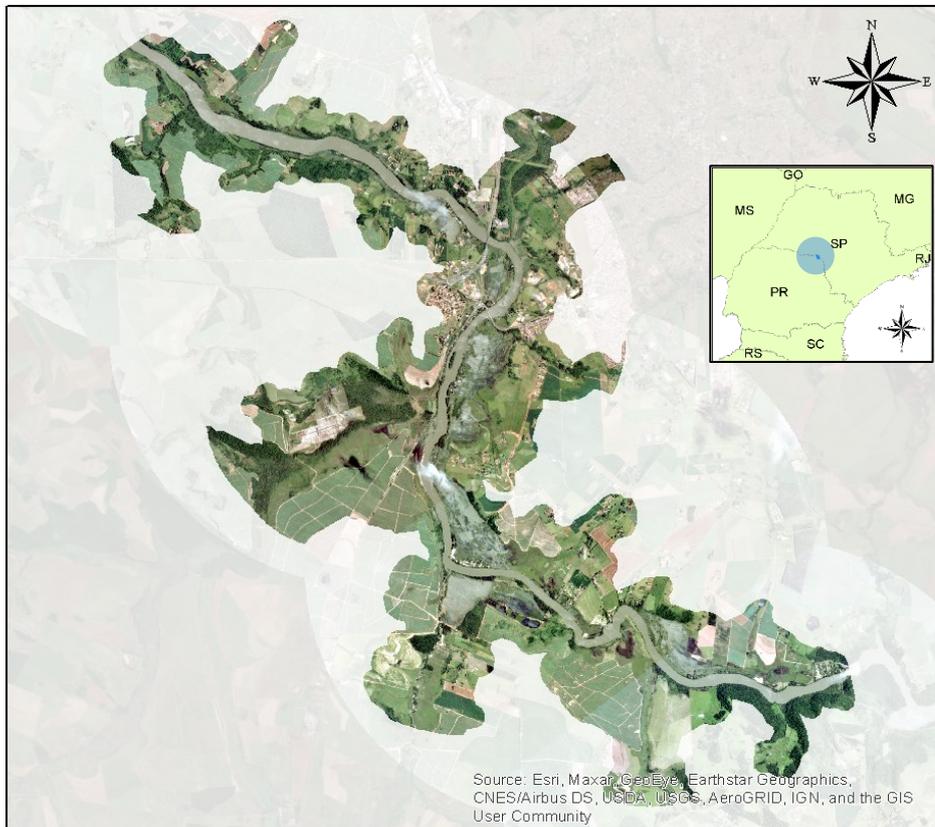
A comparação dos resultados dos modelos demonstra que de forma geral o modelo 2DH apresentou áreas inundadas maiores que o modelo 1D. Para o cenário de cheia de TR 100 anos a diferença de áreas inundadas está na faixa entre 0,6 e 7,3 %, e para o cenário de ruptura de barragens esta diferença aumenta para faixa de 1 a 19,7 %. Desta forma, observa-se uma tendência de aumento de área inundada calculada pelo modelo 2DH em relação ao 1D para cenários com maiores vazões transportadas.

5.7 Classificação da imagem de satélite

A identificação da área inundada observada na imagem de satélite foi realizada por meio do método que utiliza o processo de classificação supervisionada

automática, que Veneziani (2020)² afirma que deve ser realizado com o máximo de imparcialidade no processo, de forma que a participação subjetiva seja apenas a definição de áreas para coleta de assinatura espectral. Estes métodos segmenta a imagem conectando zonas de mesma característica espectral (informação verbal)². A Figura 52 apresenta a imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 da Planet Labs 2019, e a Figura 53 apresenta sua classificação binária terra e água.

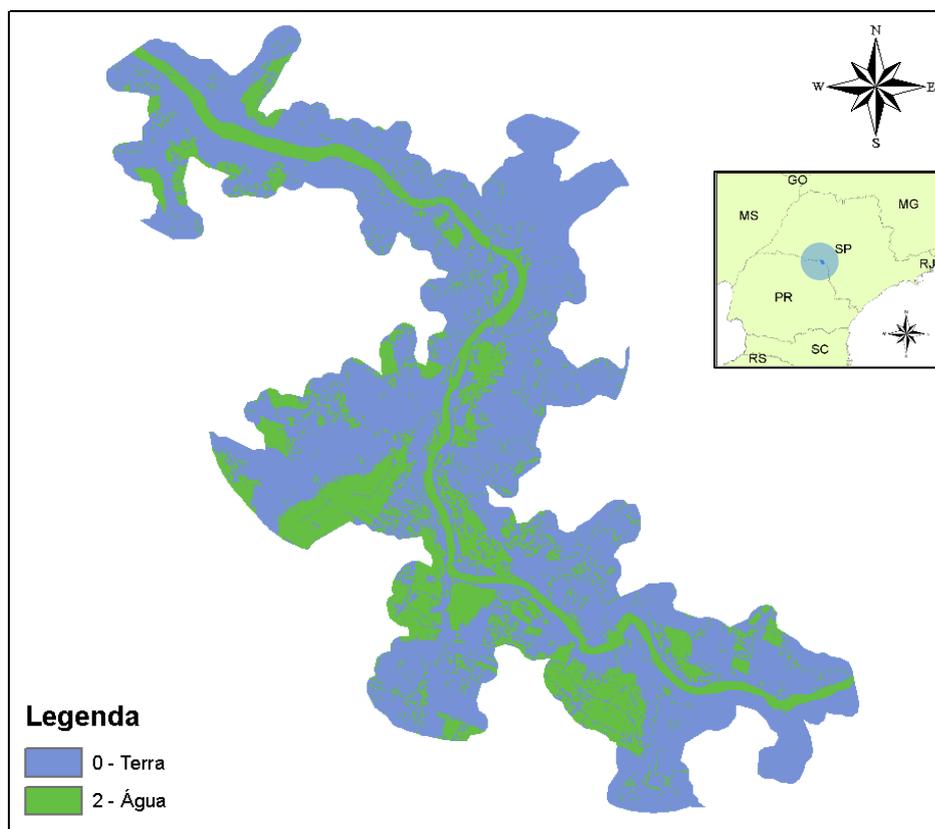
Figura 52 – imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 – trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande



Fonte: Elaborado pelo autor- imagem de satélite Planet Labs 2019

² Informação fornecida por Yuri Veneziani, Doutor em Geografia Física com ênfase em Geomorfologia Fluvial e aplicações em questões de enchentes, incluindo modelagem computacional pela Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Figura 53 – classificação binária terra e água da imagem de satélite de 21 de janeiro de 2016 – trecho entre as UHEs Ourinhos e Salto Grande



Fonte: Elaborado pelo autor- classificação realizada por Dr. Yuri Veneziani, 2020

5.8 Avaliação do desempenho dos modelos 1D e 2DH

A avaliação do desempenho dos modelos 1D e 2DH consistiu na comparação das manchas de inundação calculadas com a observada por satélite.

A mancha de inundação efetivamente observada refere-se à cheia ocorrida em 21 de janeiro de 2016, e foi delimitada da imagem de satélite da Planet Labs 2019 com resolução espacial de 3 metros.

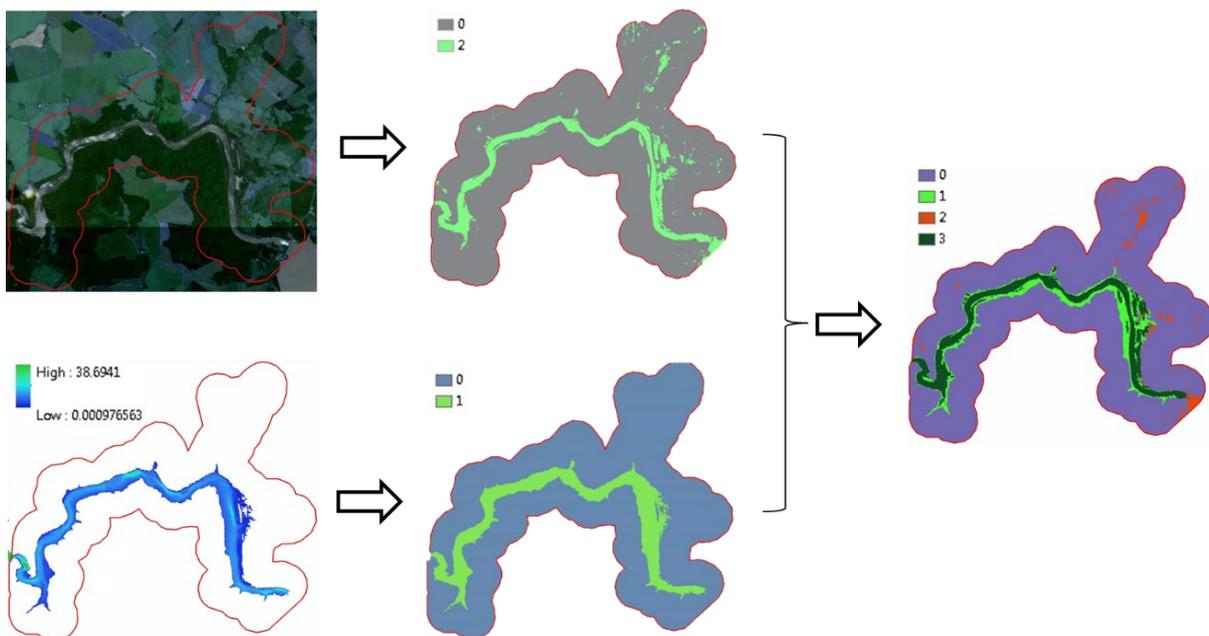
Para esta observação realizou-se a comparação binária pixel-a-pixel dos resultados dos dois modelos (1D e 2DH) com a análise “falso positivo e falso negativo” (MACHADO; SALIBA; BAPTISTA, 2018).

A comparação binária pixel-a-pixel com análise “falso positivo e falso negativo”, em cada respectiva localização, cruza as informações dos pixels da matriz de pontos (raster) da mancha de inundação calculada com as dos pixels do raster da imagem observada convertida em arquivo binário, de forma que a combinação destas duas imagens raster resulta em uma terceira com a classificação da mancha calculada.

A Figura 54 apresenta o processo de classificação, que se inicia a partir da imagem observada, convertida em arquivo binário onde o valor “0” é terra e “2” é água; e a imagem da mancha de inundação calculada também convertida, onde o valor “0” é terra e “1” é água.

Na sequência, estes dois arquivos binários são combinados e resultam na classificação da mancha calculada, onde “0” é negativo, “3” positivo, “1” falso positivo e “2” é falso negativo. A Tabela 5-8 apresenta a padronização da classificação da mancha de inundação calculada.

Figura 54 – Processo de classificação pixel-a-pixel



Fonte: o autor

Tabela 5-8 – Padronização da classificação da mancha de inundação calculada

Comparação	Resultado calculado	dado observado	Classificação
calculado = observado	Terra "0"	Terra "0"	negativo "0" (0+0)
calculado = observado	Água "1"	Água "2"	positivo "3" (1+2)
calculado inundou mais	Água "1"	Terra "0"	falso positivo "1" (1+0)
calculado inundou menos	Terra "0"	Água "2"	falso negativo "2" (0+2)

O desempenho dos modelos foi diferente para cada vale de jusante estudado. De forma geral, o modelo 2DH apresentou maior acerto que o modelo 1D, porém as diferenças são mínimas. Exceto para o vale de jusante da UHE Chavantes, onde o modelo 2DH apresentou 17,75% (56,13% - 38,38%) a mais que o modelo 1D dos pixels "positivo", onde o modelo calcula água onde realmente é água.

A Figura 55 apresenta os resultados do desempenho dos modelos. As figuras 56, 57, 58 e 59 5656apresentam o desempenho dos modelos e a respectiva classificação dos resultados para os vales de jusante Jurumirim (JUR), Paranapanema (PNP), Chavantes (CHV) e Ourinhos (OUR).

Figura 55 – Desempenho dos modelos

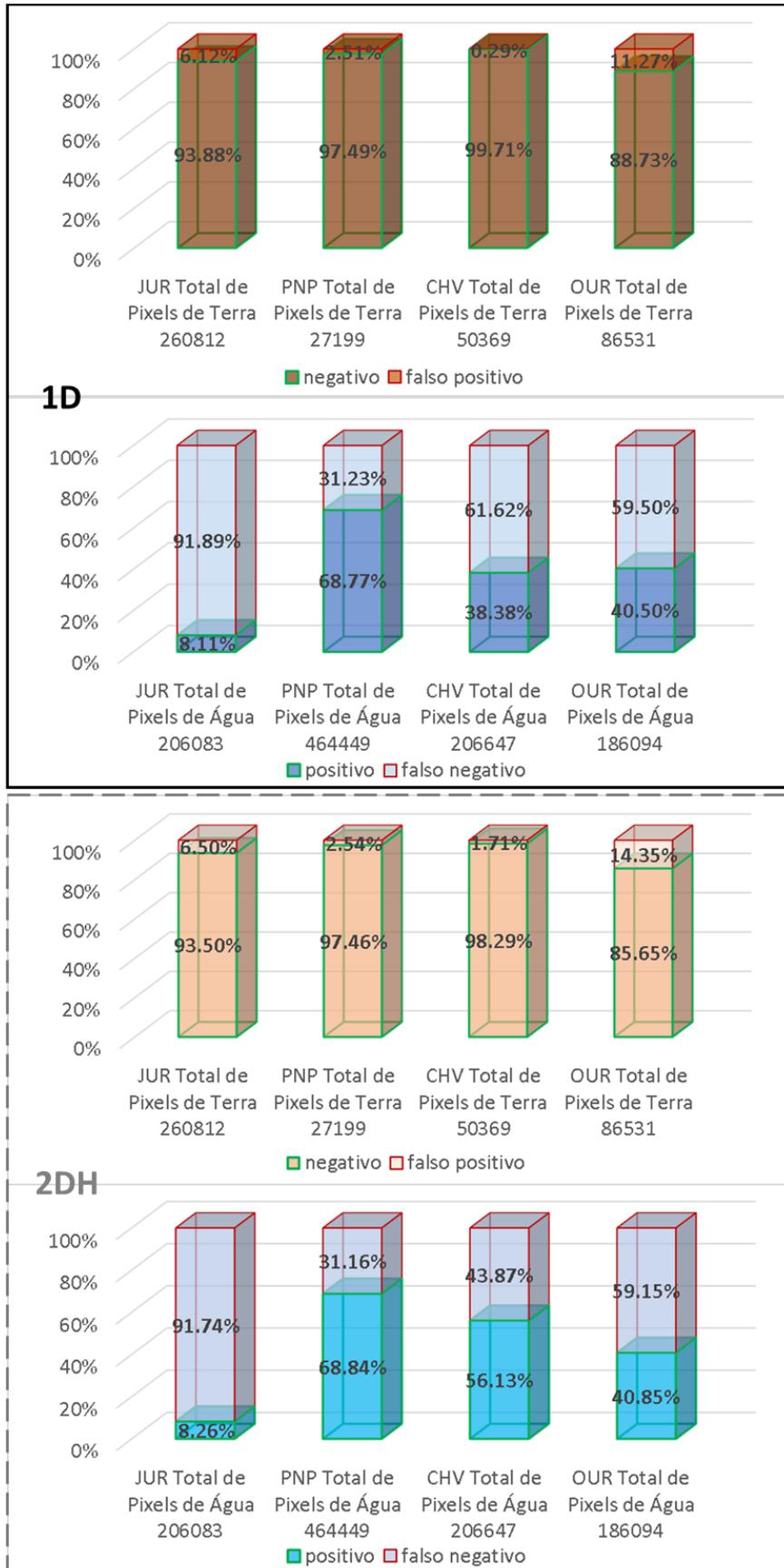


Figura 56 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Jurumirim

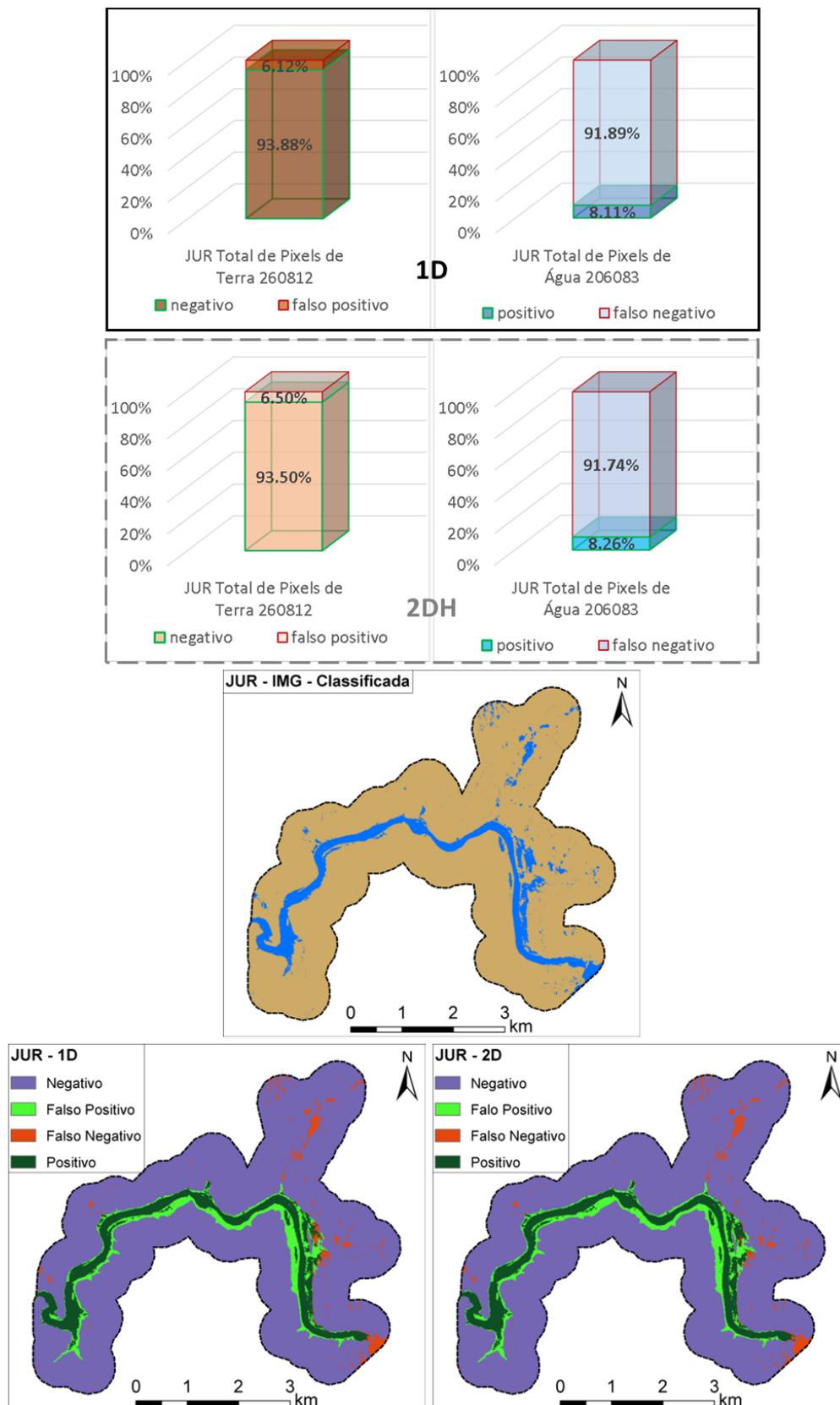


Figura 57 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Paranapanema

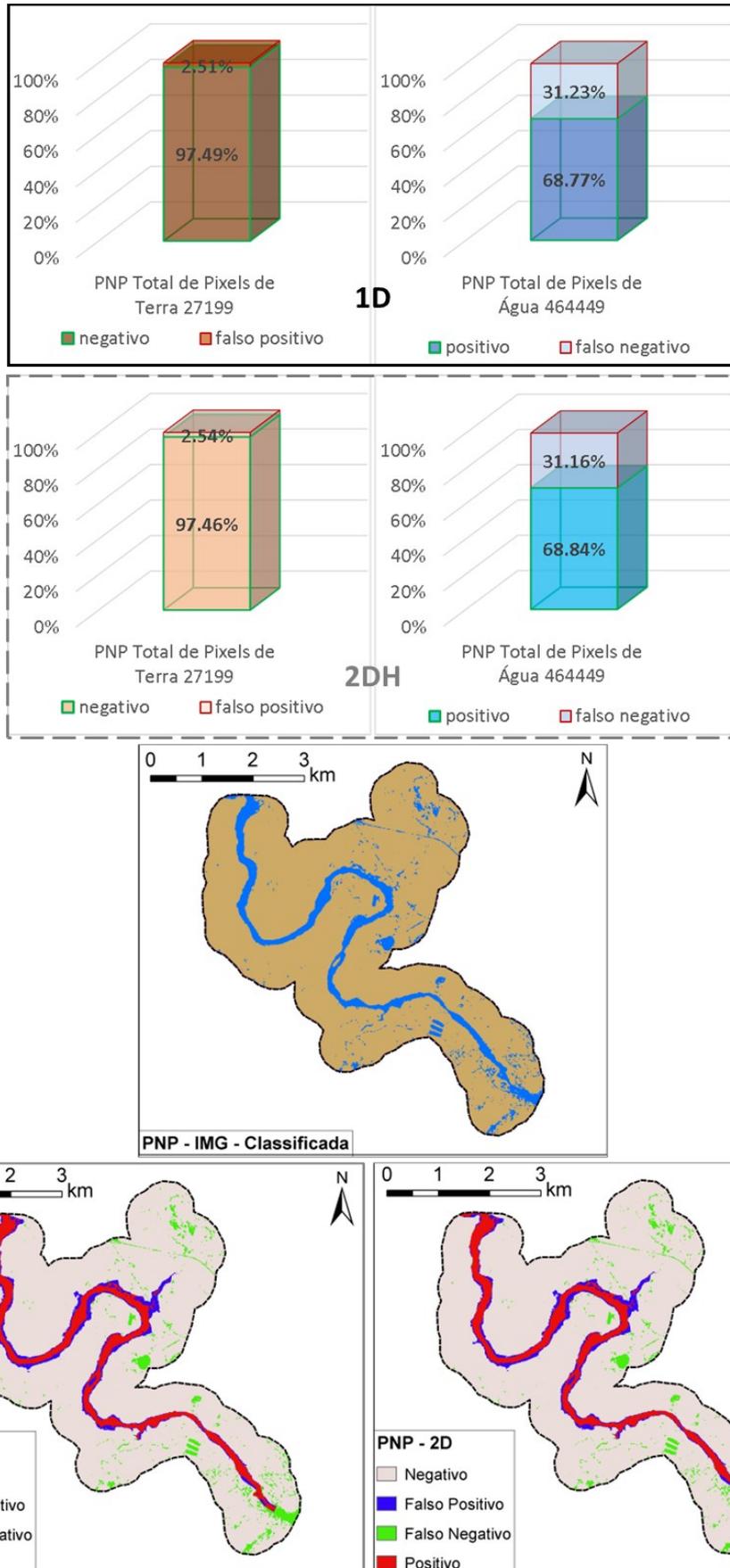


Figura 58 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Chavantes

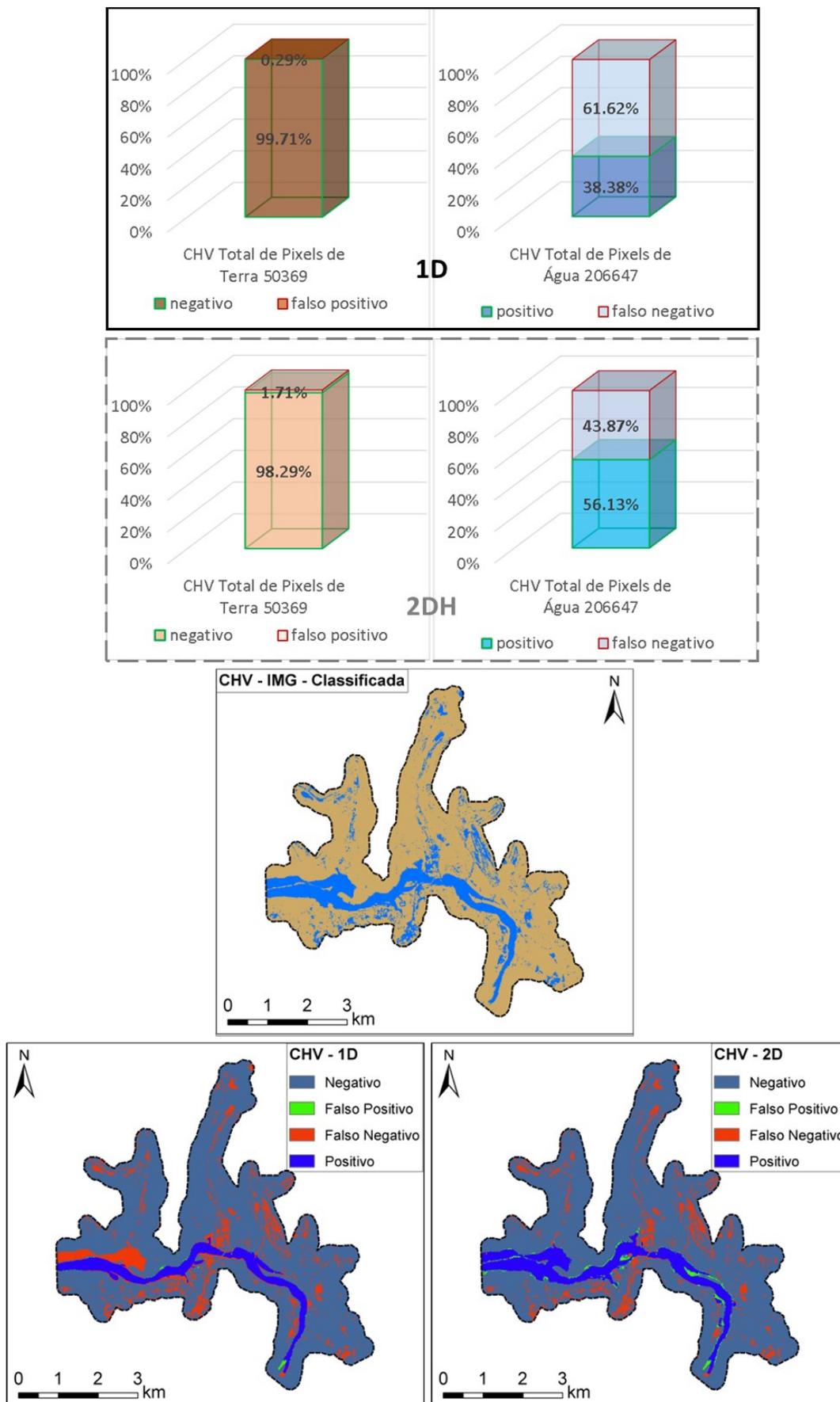
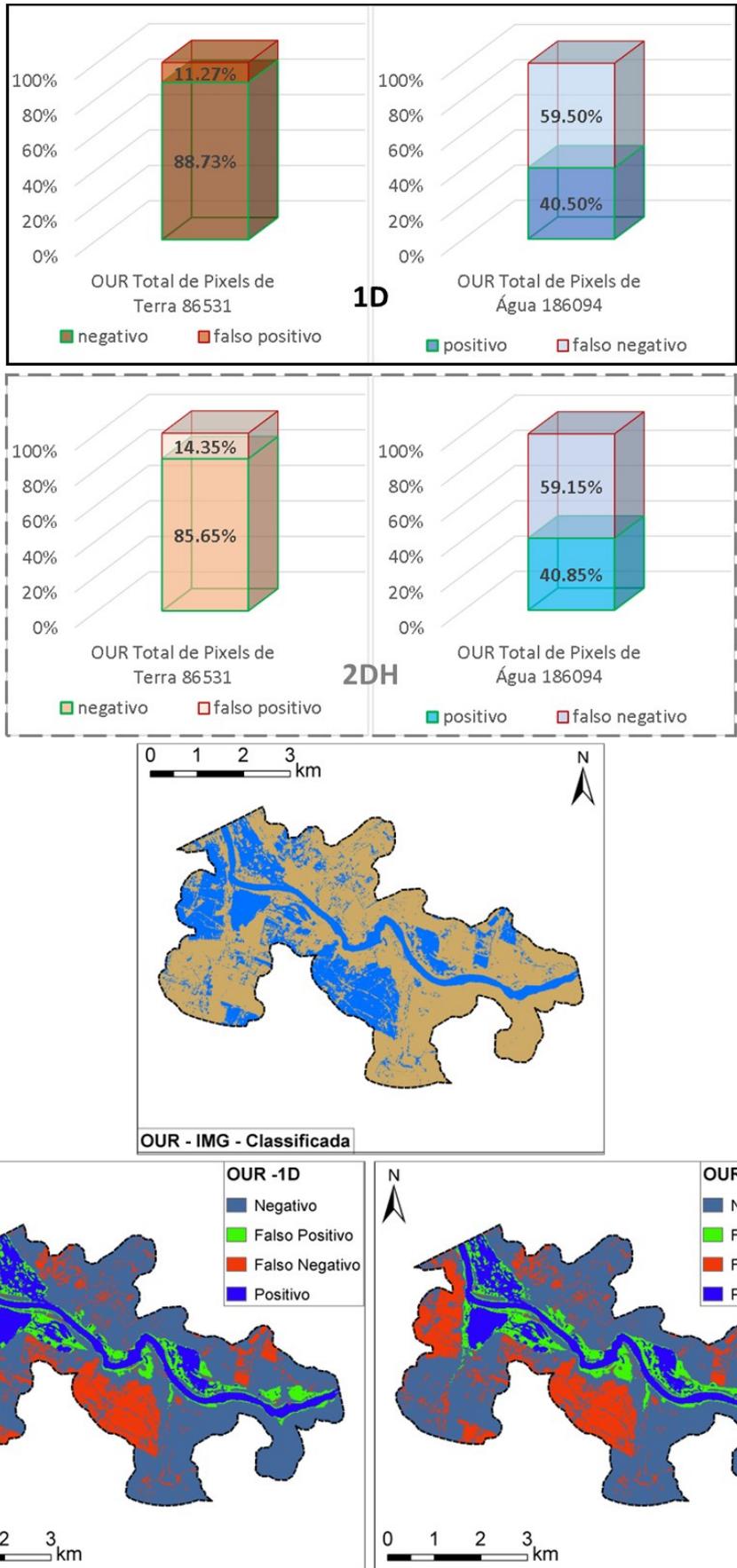


Figura 59 – Desempenho dos modelos - Vale da UHE Ourinhos



6 EFEITO DA MORFOLOGIA DO VALE DE JUSANTE NO DESEMPENHO DO MODELO HIDRÁULICO

Com os resultados do desempenho dos modelos 1D e 2DH realizou-se a correlação com o parâmetro morfológico que caracterizou os vales de inundação para os trechos estudados. Esta correlação elucida o efeito da declividade longitudinal e transversal dos vales de jusante representados pelo parâmetro morfológicos “p”, nos resultados dos modelos 1D e 2DH. A Figura 60 apresenta a relação entre área, profundidade e o parâmetro morfológico “p” de cada vale de jusante. A Figura 61, Figura 62, Figura 63 e a Figura 64 apresentam a visualização tridimensional dos vales de jusante de JUR, PNP, CHV e OUR.

Figura 60 – Relação entre área, profundidade e o parâmetro morfológico “p”

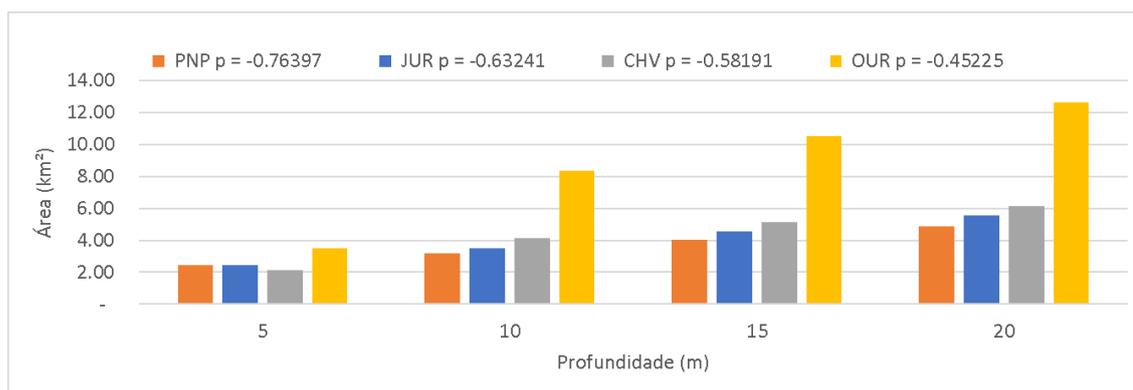


Figura 61 – Vale de jusante da Paranapanema - PNP – visualização tridimensional

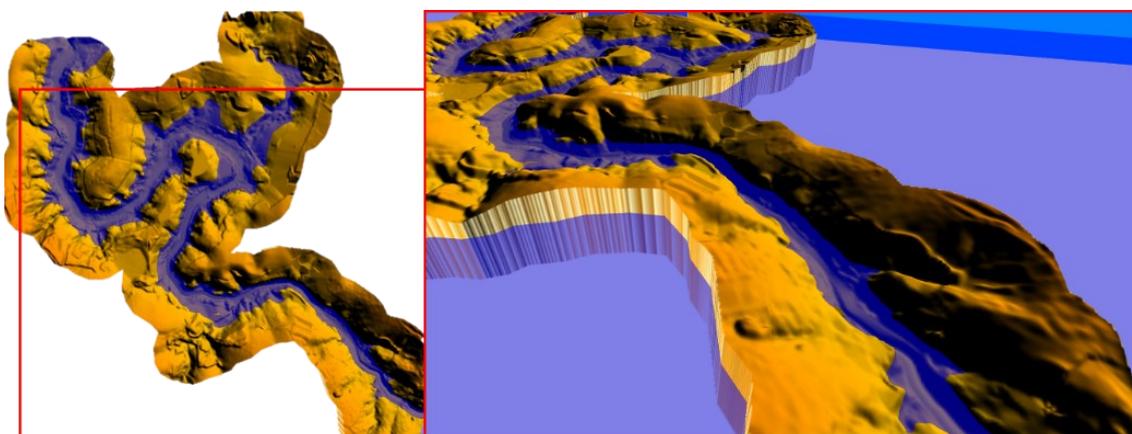


Figura 62 – Vale de jusante da Jurumirim - JUR – visualização tridimensional

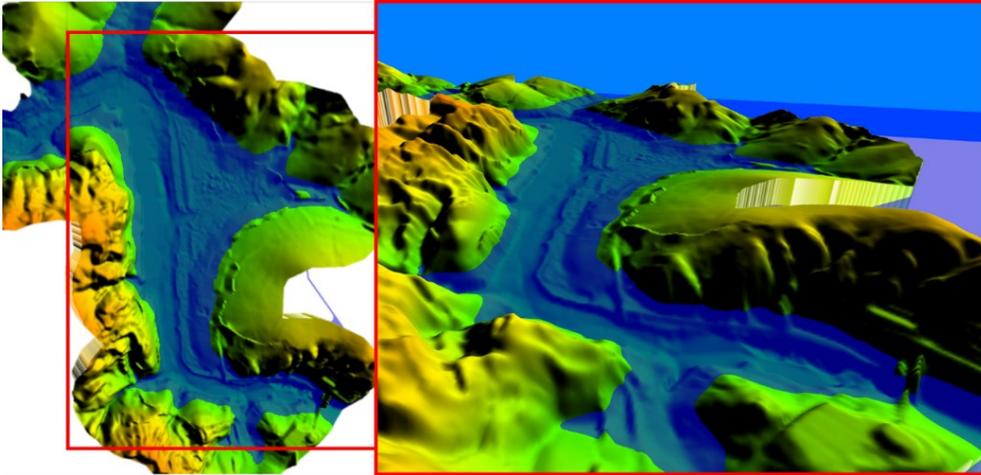


Figura 63 – Vale de jusante da Chavantes - CHV – visualização tridimensional

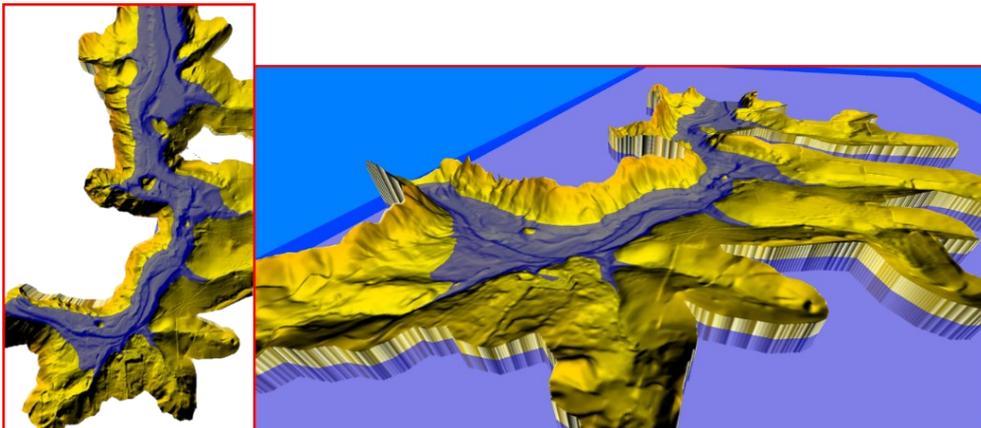
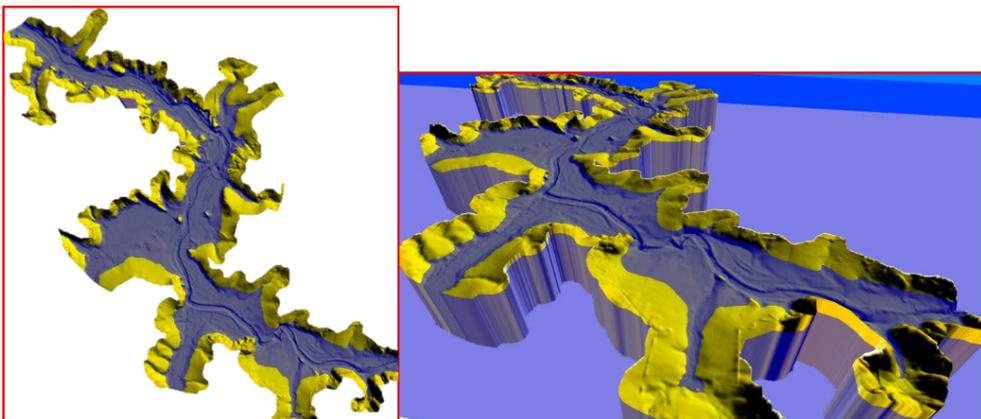


Figura 64 – Vale de jusante da Ourinhos - OUR – visualização tridimensional



Para os vales estudados observa-se uma tendência de melhora do desempenho do modelo 2DH em relação ao 1D conforme o parâmetro morfológico "p" aumenta. Exceto para o vale de jusante de Chavantes (CHV), que com um "p" intermediário o modelo 2DH apresentou um acerto de água (pixels positivos) 17,75% maior que o modelo 1D. A Figura 65 apresenta as diferenças dos pixels "positivos" dos resultados dos modelos 2DH e 1D.

A Figura 66 apresenta o desempenho dos modelos 1D e 2DH relacionado com cada vale de jusante e seu respectivo parâmetro morfológico "p".

Figura 65 – Diferenças os pixels "positivos" entre o modelo 2DH e 1D

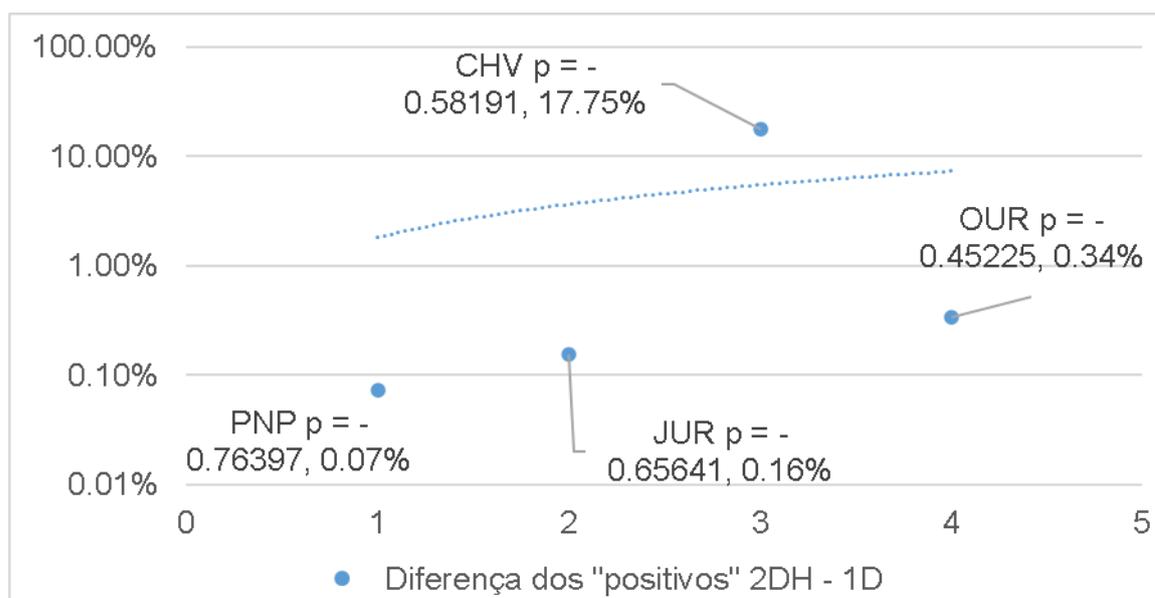
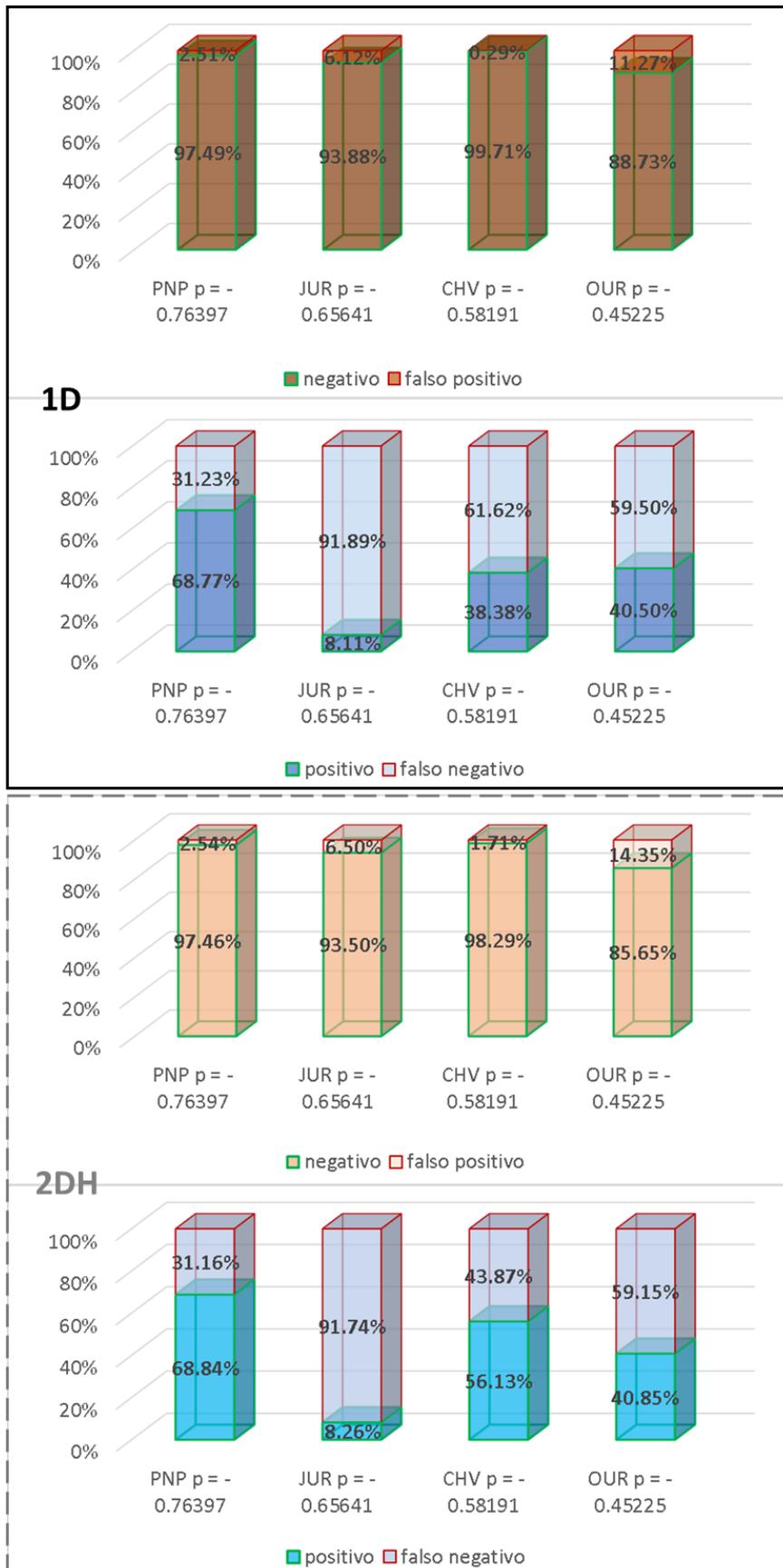


Figura 66 – Desempenho dos modelos 1D e 2DH em função do parâmetro morfológico “p” para cada vale de jusante



7 CALIBRAÇÃO COM ALTA DENSIDADE DE DADOS OBSERVADOS

Diferente do método convencional de calibração de modelos hidráulicos que levam em conta alguns ou até mesmo apenas um ponto de calibração, a calibração com alta densidade de dados observados é elaborado com base em imagens capturadas de cheias nos rios, e deste modo conta com uma alta densidade de pontos de calibração, uma vez que cada pixel de água que representa a área inundada é um ponto de calibração espacial.

Este método de calibração requer a obtenção da mancha de inundação calculada com as condições de contorno (vazões e níveis d'água) referentes a cheia observada e capturada pela imagem. O parâmetro de calibração deve ser ajustado para que a mancha de inundação calculada coincida com a observada na imagem. A vantagem deste método em relação ao método convencional é que o modelo pode ser calibrado para todo o trecho de rio estudado, ou para uma grande parte dele.

A mancha de inundação observada pode ser extraída por diversos métodos de classificação de imagem. Como apresentado no item 4.2, um destes métodos é o processo de classificação supervisionada automática, que deve ser realizado com o máximo de imparcialidade no processo, de forma que a participação subjetiva seja apenas a definição de áreas para coleta de assinatura espectral. Estes métodos segmenta a imagem conectando zonas de mesma característica espectral.

Para realizar a comparação entre a mancha observada e a calculada pelo modelo hidráulico, ambas devem ser convertidas para a forma binária, conforme apresentado no item 5.8 "Avaliação do desempenho dos modelos 1D e 2DH". A mancha observada possui a água representada por pixels de valor 2 e terra por pixel de valor 0, enquanto a mancha calculada possui a água representada por pixels de valor 1 e terra por pixel de valor 0. A comparação se dá por meio da combinação dos dois arquivos binários, que resulta na classificação da mancha calculada versus observada, onde "0" é negativo, "3" positivo, "1" falso positivo e "2" é falso negativo. Com esta última classificação pode-se verificar os acertos e os erros dos resultados

modelados. A Tabela 7-1 apresenta a padronização da classificação da mancha de inundação calculada.

Tabela 7-1 – Padronização da classificação da mancha de inundação calculada

Comparação	Resultado calculado	dado observado	Classificação
calculado = observado	Terra "0"	Terra "0"	negativo "0" (0+0)
calculado = observado	Água "1"	Água "2"	positivo "3" (1+2)
calculado inundou mais	Água "1"	Terra "0"	falso positivo "1" (1+0)
calculado inundou menos	Terra "0"	Água "2"	falso negativo "2" (0+2)

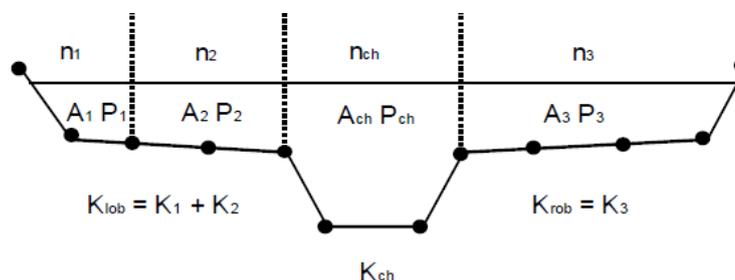
Para calibrar o modelo com base na imagem observada é necessário a realização de diversas simulações com diferentes rugosidades, que geram diversas manchas de inundação, e para cada uma delas se obtém a classificação observada-calculada com seus respectivos erros.

Este método de calibração procura minimizar este erro por meio da identificação do ponto de mínimo da curva rugosidade em função do erro total, que é a soma das curvas de erros absolutos com "Falso positivo" e "Falso negativo".

A calibração com alta densidade de dados observados foi realizada para o vale de jusante da barragem da Usina Hidroelétrica (UHE) Ourinhos com o modelo 1D, que contou com nove simulações com diferentes combinações de rugosidade para a calha e para as planícies de inundação.

Para vincular o resultado da simulação com a rugosidade inserida nas seções transversais (calha e planície) calculou-se a média da rugosidade composta de cada seção. O HEC-RAS determina o transporte total para cada seção com a divisão do escoamento nas áreas de planície de inundação (overbanks) usando os pontos de mudança de valores de rugosidade de manning, e posteriormente soma todos os valores para calcular um nível d'água na seção. A Figura 67 apresenta o subdivisão da seção transversal para o cálculo do transporte no HEC-RAS (USACE, 2016a).

Figura 67 – Subdivisão da seção transversal para o cálculo do transporte no HEC-RAS (USACE, 2016a)



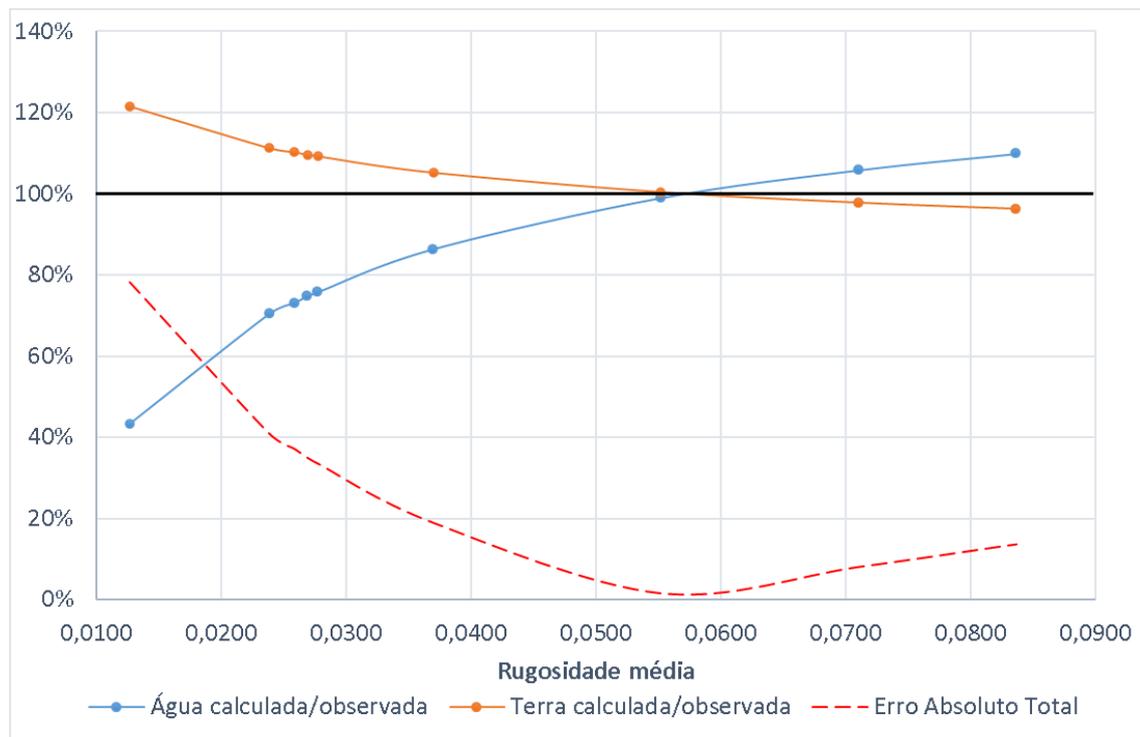
Foram realizadas nove simulações com diferentes combinações de rugosidade de Manning da calha principal e da planície de inundação, de forma que se pudesse construir uma envoltória de rugosidades médias com valores entre 0,0127 e 0,0837. A simulação de número 5 é referente ao resultado com a calibração convencional realizada em um ponto do curso d'água, conforme apresentado no item 5.4, com uma rugosidade média de 0,0277.

A área do vale de jusante da UHE Ourinhos possui 675.361 pixels na imagem observada, sendo 185.497 pixels de água, e 489.864 pixels de terra. Os valores dos pixels calculados de água e terra, as razões entre os pixels calculados e observados, erros absolutos e totais, são apresentados na Tabela 7-2. A Figura 68 apresenta as curvas das razões entre as manchas calculadas-observada e Erro Absoluto Total.

Tabela 7-2 – Resultados da comparação das manchas calculadas com a mancha observada

A Simulação	B Rugosidade média	C, D, E, F Pixel				G E/C	H F/D	I ((C-E)/C)	J ((D-F)/D)	K I + J
		Água observada	Terra observada	Água calculada	Terra calculada	Razão da água calculada e observada (%)	Razão da terra calculada e observada (%)	Erro absoluto do cálculo da água (%)	Erro absoluto do cálculo da terra (%)	Erro Absoluto Total
1	0,0127	185.497,00	489.864,00	80.343,00	595.018,00	43,31%	121,47%	56,69%	21,47%	78,15%
2	0,0238			130.507,00	544.854,00	70,36%	111,23%	29,64%	11,23%	40,87%
3	0,0258			135.542,00	539.819,00	73,07%	110,20%	26,93%	10,20%	37,13%
4	0,0269			138.548,00	536.813,00	74,69%	109,58%	25,31%	9,58%	34,89%
5	0,0277			140.489,00	534.872,00	75,74%	109,19%	24,26%	9,19%	33,45%
6	0,0370			160.156,00	515.205,00	86,34%	105,17%	13,66%	5,17%	18,83%
7	0,0552			183.515,00	491.846,00	98,93%	100,40%	1,07%	0,40%	1,47%
8	0,0710			196.210,00	479.151,00	105,78%	105,78%	5,78%	2,19%	7,96%
9	0,0837			203.709,00	471.652,00	109,82%	96,28%	9,82%	3,72%	13,54%

Figura 68 – Curvas das razões entre as manchas calculadas-observada e Erro Absoluto Total



Com a determinação do ponto de mínimo da curva de erro total absoluto foi identificado o valor da rugosidade de manning igual a 0,058 que gera o menor erro absoluto total, de aproximadamente 0.7%. Para a calibração do modelo realizou-se uma nova simulação com a rugosidade do ponto de mínimo, mais a rugosidade calibrada pelo método convencional apenas no trecho de influência do posto fluviométrico de dados observado.

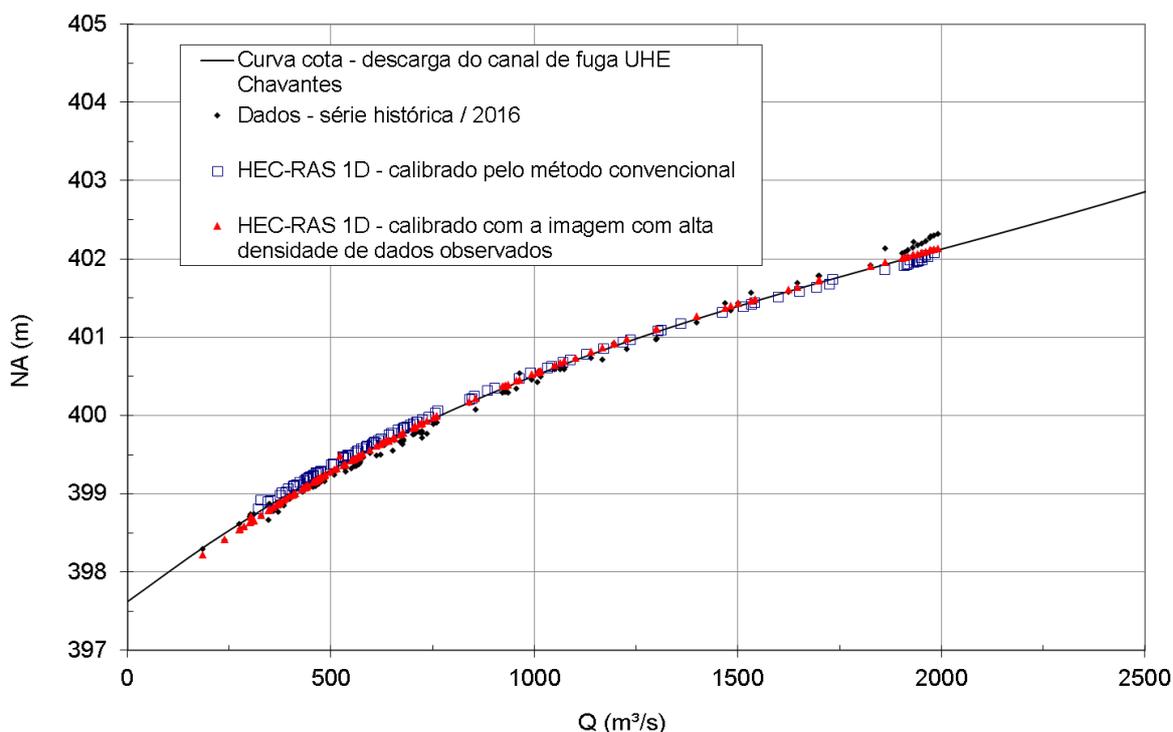
7.1 Comparação entre os resultados da calibração convencional e de alta densidade de dados observados

A comparação dos resultados do modelo calibrado pelo método convencional e pelo método alternativo (com alta densidade de dados observados) demonstra que, dependendo do número de pontos com dados utilizado na calibração tradicional, a extrapolação dos parâmetros calibrados para o restante do trecho estudado implica em erros absolutos totais maiores, quando este resultado é confrontado com a mancha de inundação observada.

Já o resultado do modelo calibrado pelo método alternativo apresentou boa aderência no ponto de calibração tradicional com um Erro Absoluto Total menor. Isto ocorre, pois, este método possui a flexibilidade de usar também os pontos de calibração tradicional, e desta forma permite definir os parâmetros de calibração tanto para estes pontos como também para o restante do trecho.

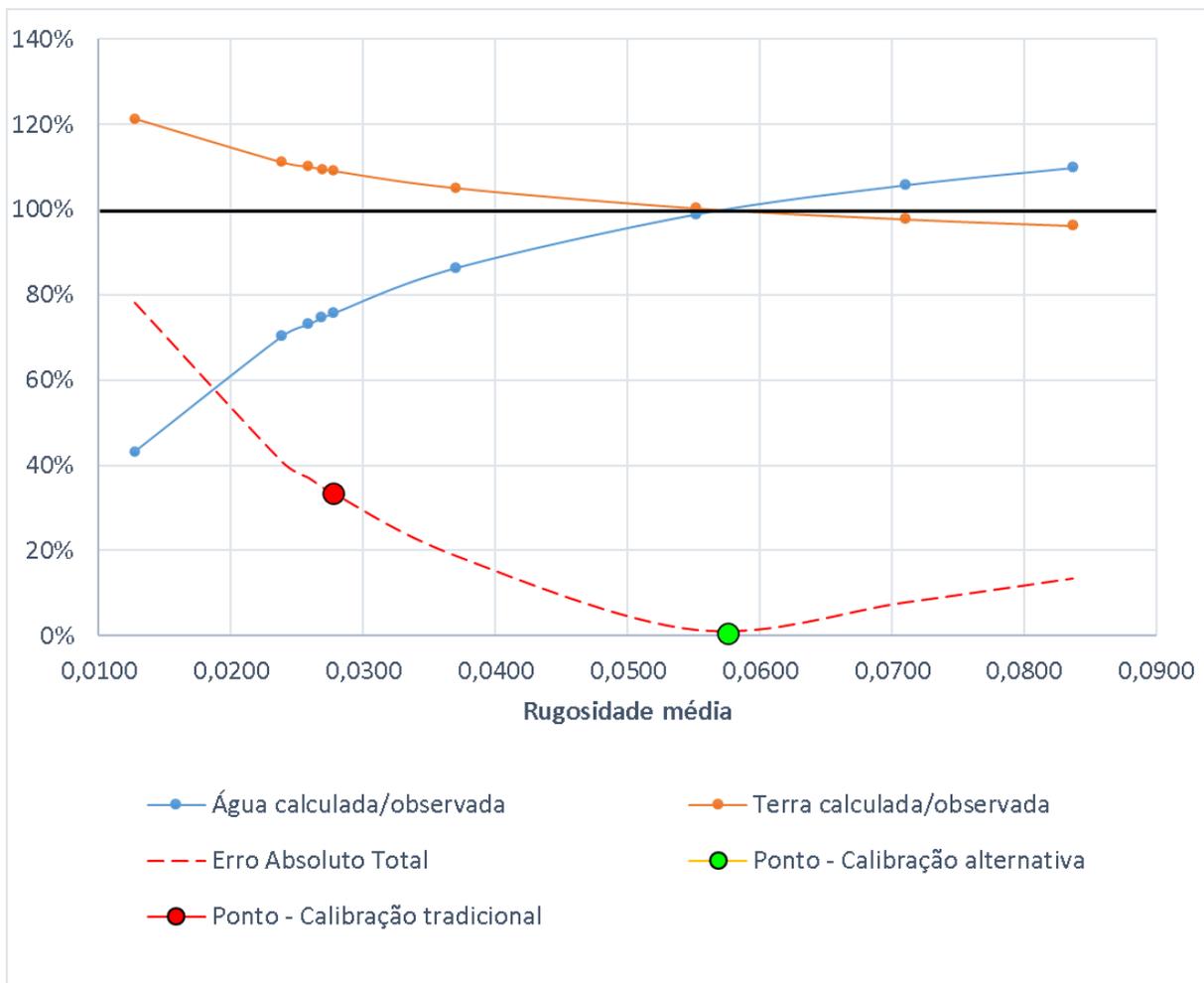
A Figura 69 apresenta o resultado da calibração alternativa no ponto de calibração convencional, onde pode-se verificar a boa aderência aos dados de nível d'água observado.

Figura 69 – Resultado do modelo calibrado para a Imagem observada no ponto de calibração convencional



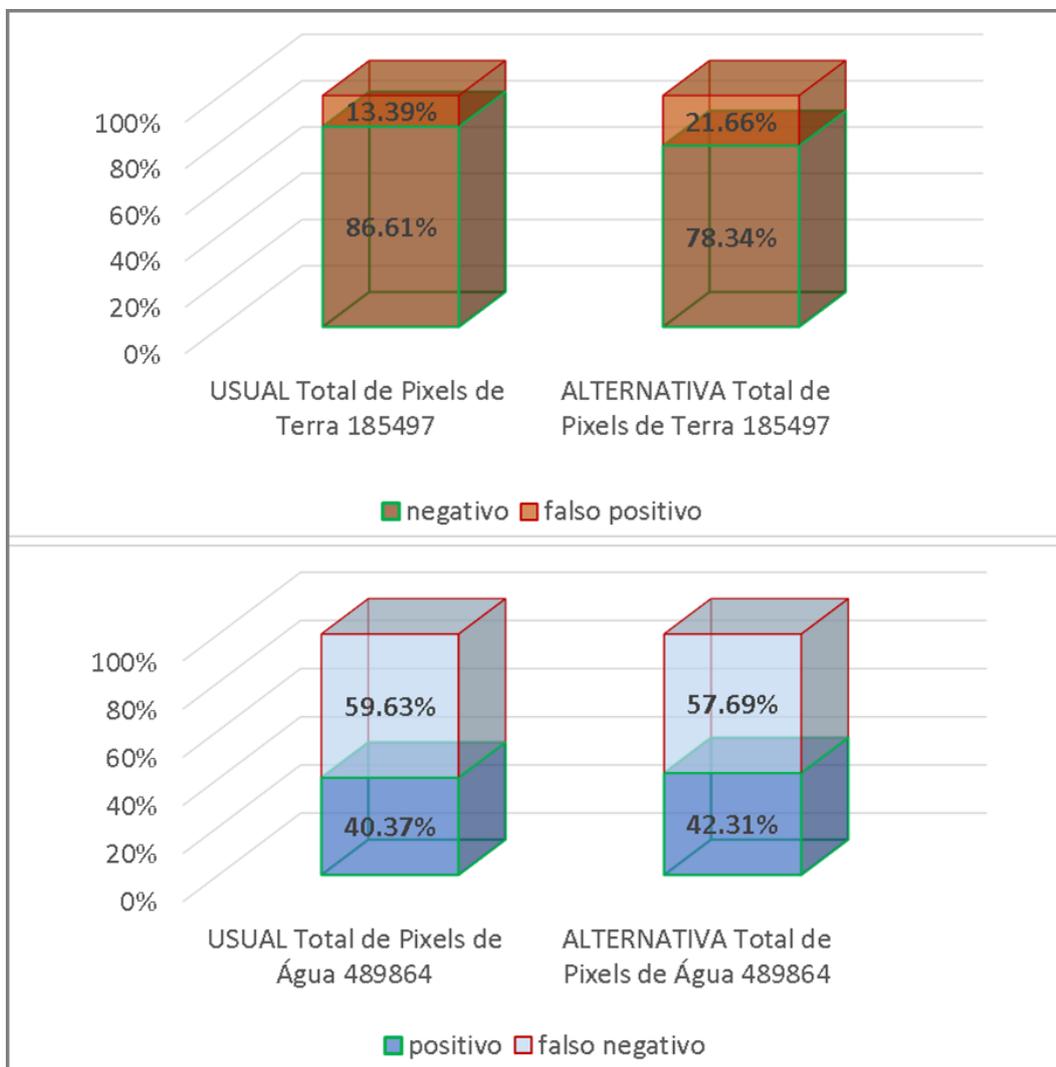
Na Figura 70 pode-se observar que o resultado da calibração alternativa encontra-se no ponto de mínimo da curva de Erro Absoluto Total com 0,57%, enquanto o resultado da calibração convencional apresenta um Erro absoluto Total igual a 33,45 %.

Figura 70 – Resultado das calibrações convencional e alternativa na curva de Erro Absoluto Total



A comparação dos métodos de calibração com base nos pixels “positivos” e “falso positivos”, que respectivamente referem-se: a todos os pixels calculados que acertam a água em relação ao total de água observada (representada pela porcentagem de acerto de água; e a todos os pixels calculados que erram a água em relação ao total de água observada (representada pela porcentagem de erro de água, apresentou melhor resultado com a calibração alternativa com alta densidade de dados observados. Nesta comparação o método alternativo apresentou 2 pontos percentuais a mais no acerto de água (pixels positivos), e 22,84 pontos percentuais a menos no erro de água (pixels falsos positivos). A Figura 71 apresenta a comparação dos pixels “positivos” e “falsos positivos” em relação a água observada total para os resultados dos métodos de calibração convencional e alternativo.

Figura 71 – Pixels “negativos”, “falsos positivos”, “positivos” e “falsos negativos” em relação a água e terra observadas para os resultados dos métodos de calibração convencional e alternativo



8 DISCUSSÃO E ANÁLISE CRÍTICA

Os modelos hidrodinâmicos, seja 1D, 2D ou 3D, utilizados para a geração de manchas de inundação exigem dados e informações de entrada dos softwares de simulação como o MDT, vazões e níveis d'água.

O trabalho de construção dos modelos dos cursos d'água também possui uma variável que tem influência significativa nos resultados das simulações. Esta variável é a configuração das redes de simulação.

As imagens de satélites utilizadas como base de alta densidade de dados observados, requerem uma classificação de imagem que converte a observação em informação de comparação dos resultados. Esta classificação também pode ser considerada como uma variável, pois dependendo do método aplicado se obtém diferentes resultados de classificação.

Os dados de vazão e nível d'água utilizados como condição de contorno das simulações são iguais para os modelos 1D e 2DH, não representando uma variável que possa diferenciar seus resultados. Salienta-se que condições de contorno intermediárias, aquelas inseridas ao longo do trecho estudado, possuem o potencial de alterar os resultados quando a área estudada possui uma abrangência onde os afluentes do curso d'água principal estão inseridos.

8.1 MDT

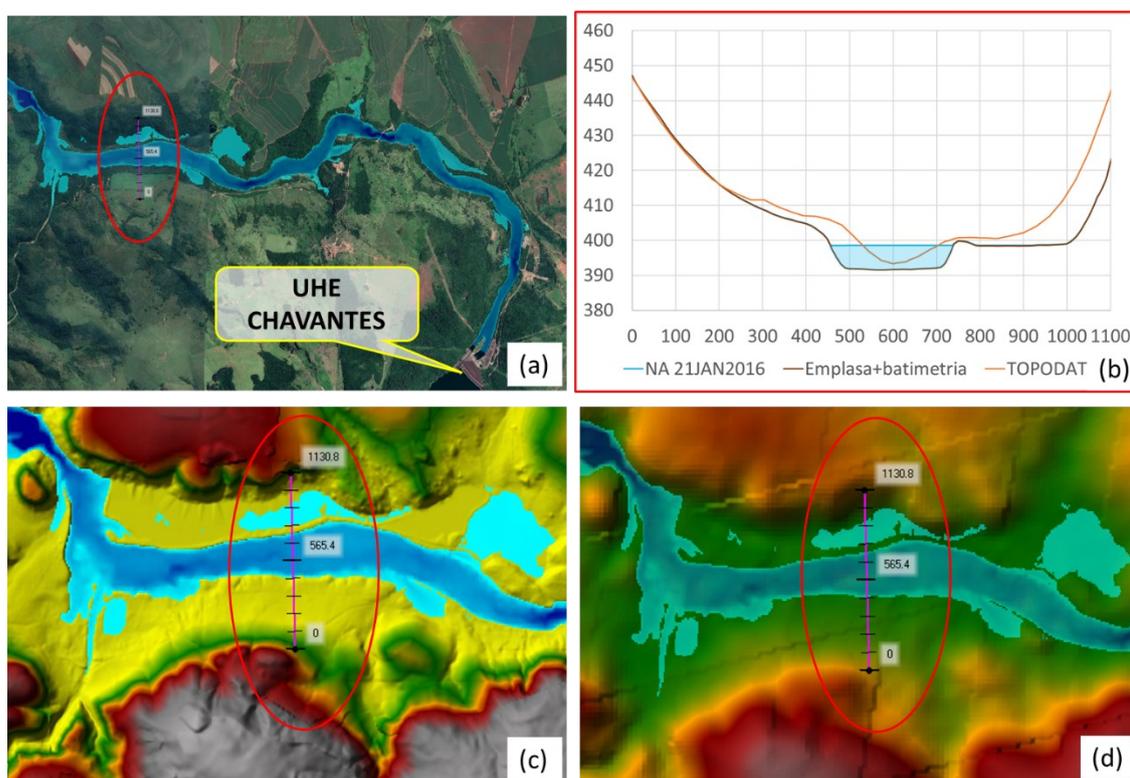
O MDT, que também é um dado de entrada do modelo, e dependendo de sua precisão espacial e altimétrica, pode influenciar significativamente nos resultados de mancha de inundação, porém é uma informação comum para os dois modelos.

Quando a calha do rio não é bem representada no MDT, as seções transversais 1D e a malha 2D que usam esta informação para criar as tabelas de dados hidrogeométricos utilizadas para os cálculos hidráulicos, geram resultados de níveis d'água com diferenças significativas em relação aos níveis observado, considerando que as outras variáveis envolvidas na modelagem são adequadas.

As planícies de inundação quanto também não são bem representadas podem gerar manchas de inundação diferentes das observadas nas imagens de satélites para um mesmo período de observação e dados de entrada (vazão e NA).

A Figura 72 apresenta a comparação da calha do rio e da planície lateral extraídas dos MDT Emplasa+batimetria e TOPODATA. A mancha de inundação apresentada nesta figura foi calculada com o MDT Emplasa+batimetria, e não representa comparação de resultado, e serviu apenas como base para a identificação da planície lateral de inundação.

Figura 72 – Comparação da seção transversal dos MDT Emplasa + batimetria e TOPODATA: (a) localização da seção transversal a jusante da UHE Chavantes; (b) seções transversais; (c) MDT Emplasa + batimetria; MDT TOPODATA



8.2 Configuração das redes de simulação dos modelos

A configuração das redes de simulação pode ser diferente dentro do próprio modelo 1D ou 2DH, e é essencialmente diferente entre eles.

O modelo 1D pode ser construído com diferentes configurações de rede como: espaçamentos diferentes entre seções transversais, com ou sem o uso de ferramenta que impedem a passagem da água para a planície de inundação antes mesmo que sua margem seja galgada, com ou sem o uso de ferramenta que simula o armazenamento na planície de inundação sem considerar o escoamento longitudinal nesta área etc.

O modelo 2DH pode ser construído com diferentes tamanhos de células e tipos como: ortogonal, hexagonal, regular ou irregular. Podem ser construídos também com ou sem linhas de breque que forcem a malha a acompanhar os contornos das grandes mudanças de declividade do terreno, como por exemplo as margens ou o topo da calha de um curso d'água. Dependendo da configuração que o modelo 2D for construído, os resultados podem ser mais ou menos fidedignos à realidade.

Os resultados do vale de jusante da UHE Chavantes para a simulação da cheia de 21 de janeiro de 2016 demonstraram que a configuração da rede pode interferir significativamente nos resultados. Conforme apresentado anteriormente, o modelo 2DH apresentou um acerto de água (pixels positivos) 17,75% maior que o modelo 1D. A Figura 73 e a Figura 74 apresentam a comparação dos resultados das simulações 1D e 2D para o vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016.

Figura 73 – Comparação do resultado da simulação 1D para o vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016

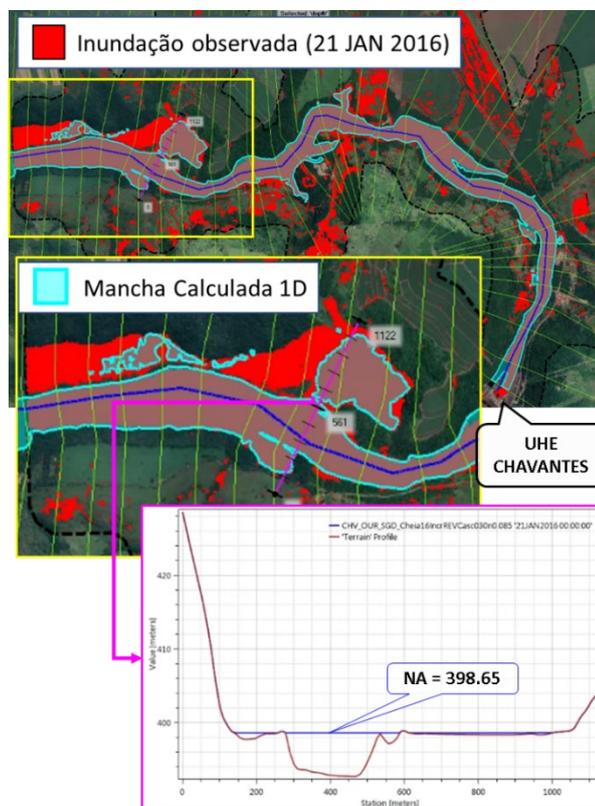
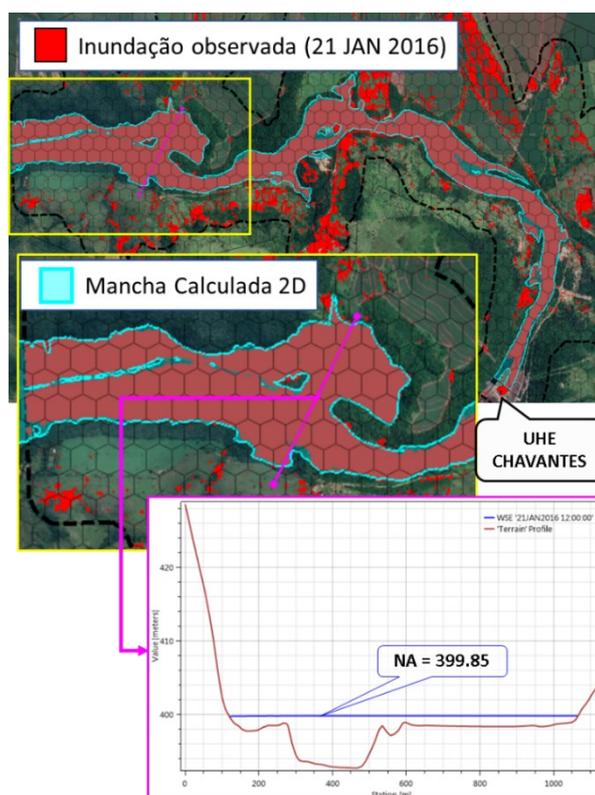
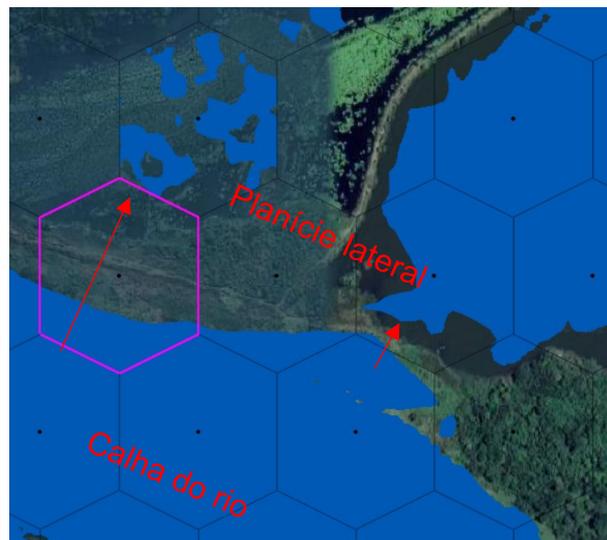


Figura 74 – Comparação do resultado da simulação 2D para o vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016



A configuração da rede de simulação 1D pode contribuir para um resultado como este, uma vez que este trecho possui um espaçamento médio entre as seções transversais de 250 m, enquanto para os demais vales estudados no presente trabalho o espaçamento é de 150 m. Outra configuração que contribuiu para este resultado é a configuração e discretização da malha 2D, que para CHV é hexagonal/regular de 150m, sem linhas de quebras para caracterizar as mudanças de declividade do terreno, como por exemplo, o topo do canal e início da planície de inundação. Esta configuração com células grandes e sem linhas de quebra, contém células que abrangem parte da calha principal do rio e parte da planície de inundação, e desta forma transferem volume de água para células adjacentes antes mesmo de galgar os pontos altos como a margem do canal. A Figura 75 apresenta em estaque uma célula que abrange tanto a calha como a planície lateral do rio Paranapanema, e a célula adjacente molhada.

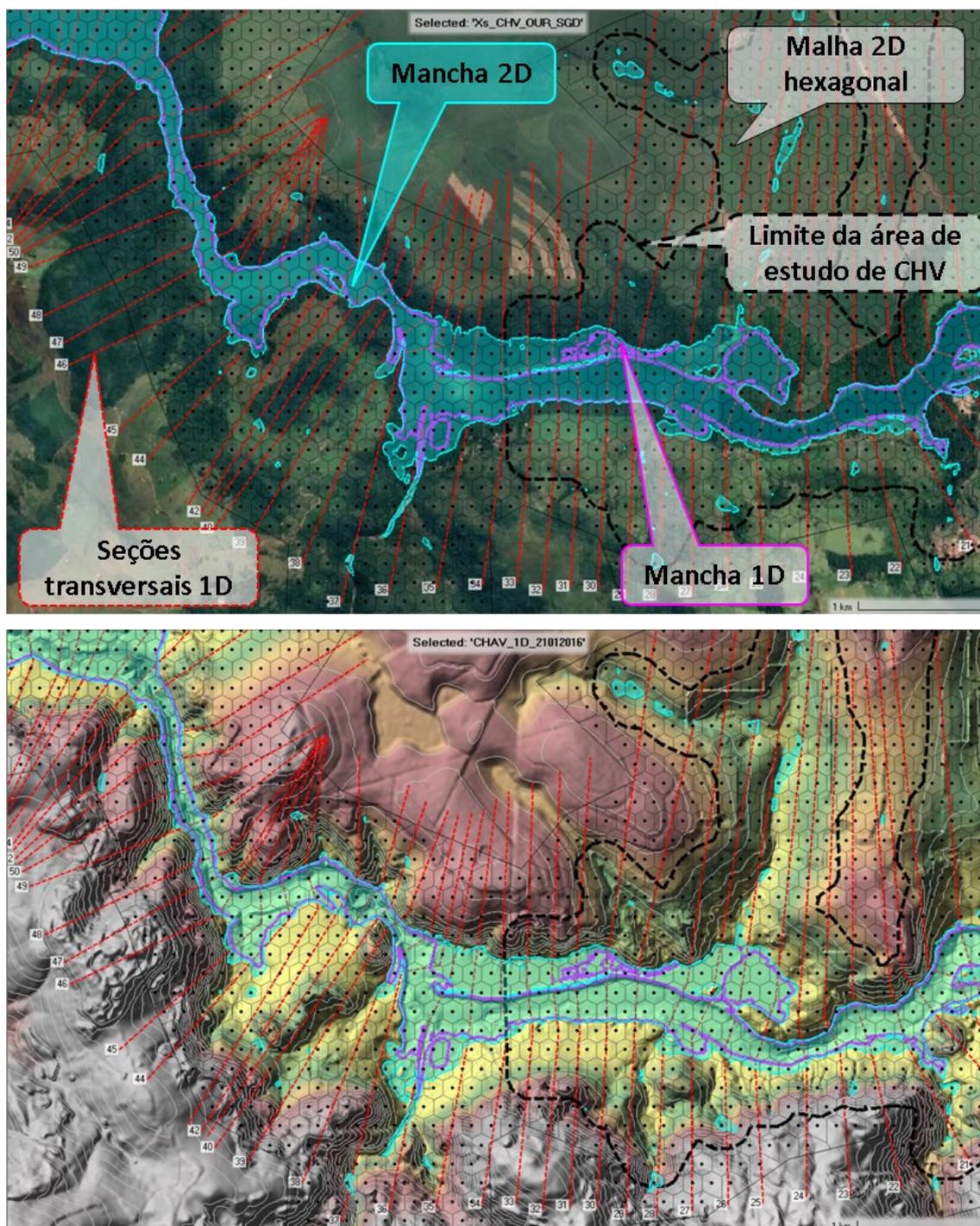
Figura 75 – Malha 2D com células que abrangem a calha e a planície lateral



Por outro lado, salienta-se que a modelagem 2D teve como resultado o extravasamento da calha na data de 21 de janeiro de 2016 para o vale a jusante de Chavantes (data da imagem observada). Este resultado não foi observado na modelagem 1D, pois o espaçamento das seções não caracteriza os estrangulamentos da mesma forma que a malha 2D, e desta forma há um número menor de pontos de controle de nível d'água no modelo 1D, que calcula NAs mais baixos. A Figura 76 apresenta a comparação entre a configuração da rede de simulação 1D e 2D para o

vale de jusante de CHV, onde pode-se verificar uma discretização maior dos estrangulamentos na malha 2D do que na rede 1D.

Figura 76 – Comparação entre as seções transversais do modelo 1D e a malha do modelo 2D para o vale de jusante de CHV



8.3 Classificação da imagem do evento observado

A classificação da imagem de um evento observado visa converter a informação de área inundada capturada pela imagem em dados utilizados como referência para calibração e validação das manchas de inundação calculadas, que são resultantes das simulações hidrodinâmicas.

Os métodos de classificação de imagens digital podem ser agrupados, ou não, de uma fase de treinamento. Esta fase pode ser denominada como “aprendizado de máquina”, que é o subconjunto de inteligência artificial, que constrói um modelo matemático com base em dados de amostra, conhecido como “dados de treinamento”. Existem três tipos de natureza de dados: supervisionada, não supervisionada e semisupervisionada ou híbrida. (SIMIONI, 2021; VENTURIERI; SANTOS, 1998)

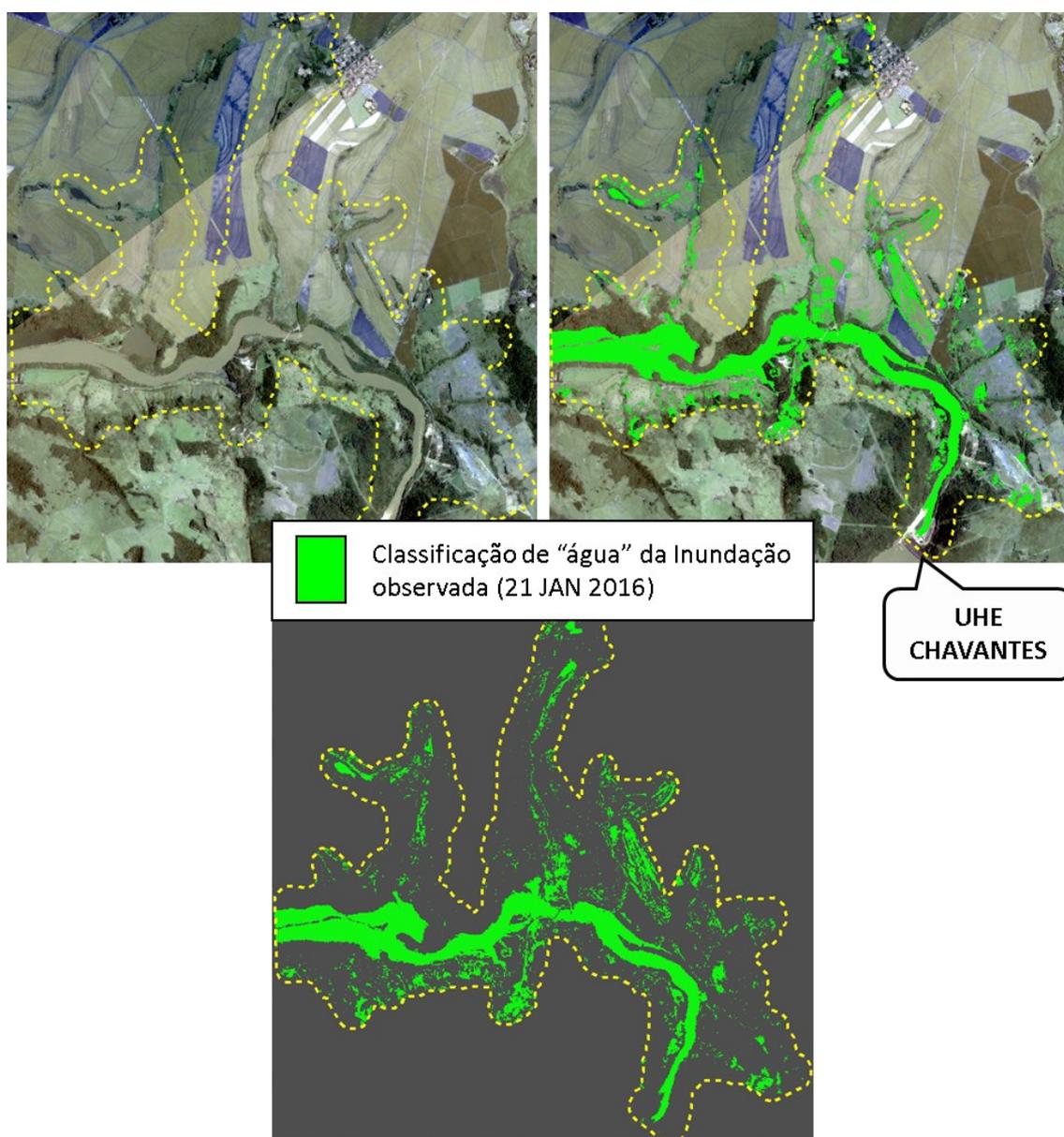
Estes métodos classificam a imagem como um todo, de forma que todos os pixels da imagem são classificados. Assim em um evento de cheia de um rio, no qual geralmente é acompanhado de precipitações, a imagem observada apresenta pixels de áreas empoçadas que não são necessariamente causadas pelo extravasamento da calha do rio. As simulações apresentadas neste estudo calculam a hidrodinâmica no curso d'água que transborda com a passagem da cheia observada, sem a inserção de condições de contorno (vazões) intermediárias para representar os afluentes do curso d'água principal. Sendo assim, a classificação da imagem identifica um número de pixel de “água” muito maior do que as manchas de inundação calculadas, dentro do buffer selecionado. O critério de seleção deste buffer ou área de estudo, pode variar, e no presente trabalho baseou-se na área utilizada para a realização do estudo morfométrico.

Por outro lado, as áreas empoçadas localizada próximas à calha, porém desconectadas do curso d'água, podem representar o extravasamento da calha em um momento anterior ao do instante capturado pela imagem.

Caso a classificação da imagem seja realizada manualmente, e assim de forma subjetiva, para delimitar apenas a área inundada por extravasamento da calha do rio, o dado observado pode não representar a realidade, pois o processo deixa de ser imparcial.

A Figura 77 apresenta os pixels classificados como “água” da imagem de satélite da data de 21 de janeiro de 2016 no vale de jusante da UHE Chavantes, onde pode ser observado que grande parte dos pixels classificados como “água” estão distantes da calha principal do rio Paranapanema, o que representa os afluentes. Nota-se que a classificação não distingue os pixels referente apenas ao extravasamento do rio com a passagem da cheia.

Figura 77 – Pixels classificados como “água” no vale de jusante da UHE Chavantes para o evento observado de 21 de janeiro de 2016



9 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve como objetivo relacionar a morfologia dos vales de jusante de barragens com o desempenho dos modelos 1D e 2DH, avaliado por meio da comparação das manchas de inundação calculadas com a mancha observada na imagem de satélite, referentes aos eventos ocorridos em janeiro de 2016. Para isso foram realizadas simulações hidrodinâmicas 1D e 2DH nos vales a jusante das barragens de Jurumirim, Paranapanema, Chavantes e Ourinhos, localizadas no rio Paranapanema na divisa dos estados de São Paulo e Paraná.

Os modelos matemáticos são ferramentas imprescindíveis em praticamente todas as componentes do empreendimento barragem, especialmente nos estudos ligados à gestão de risco e segurança. Neste aspecto, espera-se que os modelos de simulação do escoamento fluvial destinados à estimativa de áreas inundáveis tenham representatividade e eficiência compatíveis com o vulto desses riscos. Neste contexto, somado aos avanços tecnológicos computacionais que possibilitam realizar simulações de modelos bidimensionais em curtos e médios períodos de processamento, a análise do desempenho dos modelos 1D e 2DH torna-se de suma importância no meio técnico.

O software de simulação hidrodinâmica HEC-RAS utilizado para avaliar o desempenho dos modelos 1D e 2DH possui o módulo RasMapper que facilita a construção e configuração das redes de simulação, e possui ferramentas que facilitam os ajustes necessários nas redes 1D e 2D para que o modelo possa ser calibrado. Neste módulo também é possível visualizar e extrair de forma simples os resultados das simulações.

Os dados de entrada referente às vazões horárias observadas, regras operacionais das barragens e o MDT com resolução espacial de 5 metros, possuem qualidade e precisão suficientes, e contribuíram para alcançar o objetivo do presente trabalho.

Com relação à classificação da imagem de satélite que foi utilizada como informação observada de um evento de cheia de janeiro de 2016, que identificou um grande número de pixels referente a água que não representam exclusivamente o

transbordamento da calha do rio, conclui-se que esta etapa foi adequada para o estudo, uma vez que foi utilizada como base de comparação para ambos os resultados dos modelos 1D e 2DH, e desta forma não introduziu incertezas na análise e comparação do desempenho dos modelos.

O estudo morfométrico que caracterizou a topografia dos vales de jusantes das barragens, relacionou as áreas das superfícies passíveis de inundação com as suas respectivas profundidades, que por meio da equação (27) foi possível definir um parâmetro “p” para cada vale. Pode-se concluir que, para os quatro vales estudados, quanto menor a declividade média do curso d’água maior é o parâmetro “p”.

A calibração tradicional de ambos os modelos (1D e 2DH), que utilizou apenas um local de observação de dados em cada trecho simulado, demonstrou boa aderência dos resultados calculados aos dados observados de nível d’água e vazão. Salienta-se que esta calibração pontual, como tradicionalmente é realizada, não define os parâmetros hidráulicos que representam completamente o trecho do vale a jusante estudado, super ou subestimando os resultados modelado em grande parte do trecho do rio.

A calibração com alta densidade de dados observado, denominada neste trabalho como “calibração alternativa”, faz com que os modelos de simulação do escoamento fluvial destinados à estimativa de áreas inundáveis tenham representatividade e eficiência compatíveis com a gestão de risco e segurança de barragens. Conclui-se que a calibração com alta densidade de dados observados, mesmo quando as simulação não representam as vazões dos afluentes, apresenta vantagens em relação ao método tradicional, uma vez que o resultado do método alternativo apresentou desempenho superior ao método tradicional.

Com a abundância e disponibilidade de dados de imagens de alta resolução, assim como a tendência de diminuição dos custos para aquisição destes dados por conta da evolução tecnológica e concorrência de mercado, torna a calibração de modelos hidráulicos baseados em alta densidade de dados observados cada vez mais indispensável nos estudos de risco e segurança de barragens.

Com a avaliação do desempenho dos modelos dos trechos do rio Paranapanema estudados, conclui-se que o modelo 1D calculou resultados positivos, que são aqueles que o modelo acerta em relação à água observada, com a mesma porcentagem de acerto do modelo 2DH, com pequenas diferenças em décimos de porcentagens para três dos quatro vales estudados (Paranapanema, Jurumirim e Ourinhos).

Ambos os modelos acertaram entre 8 e 70 % da água observada (“positivo”), pelo fato que nas simulações não foram consideradas as vazões intermediárias para representar o escoamento nos afluentes dos trechos estudados do curso d’água principal. Desta forma conclui-se que com os resultados obtidos torna-se evidente a necessidade de representar não somente as condições de contorno usuais de montante e jusante, como também as intermediárias, para representar todos os escoamentos fluviais da área estudada.

No que diz respeito as áreas onde os modelos não deveriam inundar, pixels “negativo”, os resultados demonstraram bom desempenho dos modelos, representado por uma faixa entre 85 e 99% da área onde realmente não deveria ser inundada.

Para os vales com valores maiores do parâmetro “p”, e conseqüentemente com menores declividades, a diferença de acerto entre os modelos aumenta, para os quais o modelo 2DH é mais assertivo do que o modelo 1D. Desta forma conclui-se que houve uma tendência do aumento do desempenho do modelo 2DH em relação ao modelo 1D para vales com maior parâmetro “p”.

O vale de jusante da UHE Chavantes representou um ponto discrepante na avaliação do desempenho dos modelos, pois o acerto de água do modelo 2DH é significativamente maior do que o do modelo 1D, com uma diferença de 17,75%. Conclui-se que a discretização da rede de simulação 1D não representou os estrangulamentos como na malha 2D, e desta forma contribuiu para esta diferença de resultados.

Com relação às recomendações de trabalhos futuros, e a superação de algumas limitações encontradas neste trabalho, tem-se as considerações a seguir.

Não foram realizadas análises de sensibilidade da configuração das redes de simulação. Sugere-se avaliar os resultados com diferentes configurações de rede 1D e de malha 2D para um mesmo trecho de rio, de forma a elucidar o grau de detalhamento necessário para que se possa obter resultados mais fidedignos.

Com relação à classificação de imagem, sugere-se que seja realizada em trabalhos futuros uma classificação que represente principalmente o transbordamento da calha do rio, e o buffer da área de estudo seja ajustado para minimizar a identificação das águas dos afluentes, e em conjuntos deve-se considerar as vazões ao longo do trecho do rio como condição de contorno intermediária.

Com os resultados obtidos no presente trabalho, conclui-se que de uma forma geral o desempenho dos modelos 1D e 2DH foram similares. Para que se possa identificar quais características morfológicas apontam a utilização do modelo 1D ou do 2D, indica-se que seja realizado estudos de comparação de resultados para um número maior de vales, com características morfológicas opostas umas das outras, de modo a cobrir uma grande faixa de variação das características topográficas.

Por fim, recomenda-se para futuras análises a simulação de um número de cenários suficiente para combinar todas as variáveis que envolvem as simulações hidrodinâmicas e a geração de manchas de inundação.

A Tabela 9-1 apresenta como sugestão a quantidade de cada uma das 5 variáveis que, quando combinadas, geram o número de cenários com a capacidade de avaliar com mais eficácia os desempenhos dos modelos e relacioná-los com as características dos vales, configurações das redes, presença ou ausência de vazões intermediárias, e resoluções de MDT.

Tabela 9-1 – Sugestão de quantidade de cada variável e número de cenários

Nº de vales com diferentes características topográficas	9
Nº de eventos observados	3
Nº de configurações de rede 1D e 2DH	6
Com e sem as vazões intermediárias que representam os afluentes	2
Nº de MDTs com resoluções diferentes	2
Nº de cenários combinados	648

Com estas recomendações, seria possível identificar qual o tipo de topografia que cada modelo apresenta melhor desempenho, e assim possibilitar a definição de um critério para a utilização de modelos 1D e 2DH.

10 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J., J. ***A History of Aerodynamics: And Its Impact on Flying Machines (Cambridge Aerospace Series)***. Cambridge: Cambridge University Press: 1997.
- BERNARDINO, J. C. D. M. ESTABILIDADE DE CURSOS D'ÁGUA ESCOANDO SOBRE LEITOS ALUVIONARES NÃO COESIVOS. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 2005.
- BRASIL. Decreto N°89.817: Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. [S.l] : [s.n]. pp.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico, Campo Grande: ABRH, 2009. 2009.
- COOK, A.; MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. 377, n. 1, p. 131-142, 2009.
- CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. Practical aspects of computational river hydraulics. 1980.
- DA SILVA, T. B.; LUCCI, R. M.; MARTINS, J. R. S.; ARAÚJO, C. Comparação entre os modelos hidráulicos cliv+ e hec-ras em estudos de ruptura de barragens com afogamento da brecha. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, realizado de 17 a 22 de novembro de 2013, em Bento Gonçalves – RS. 2013.
- DI BALDASSARRE, G.; SCHUMANN, G.; BATES, P. D. A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. **Journal of Hydrology**, 367, n. 3, p. 276-282, 2009/04/15/ 2009.
- DIMITRIADIS, P.; TEGOS, A.; OIKONOMOU, A.; PAGANA, V. *et al.* Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. **Journal of Hydrology**, 534, p. 478-492, 2016/03/01/ 2016.
- DUARTE, B. P. S.; LUCCI, R. M.; BERNARDINO, J. C. M.; MARTINS, J. R. S. Analysis Of The Differences Between Flooded Areas Generated With A Digital Model Of Surface (Dsm) And A Digital Model Of Elevation (Dem), Applied To The Paranapanema River Cascade, And The Study Of Its Impact In The Downstream Valley Risk Evaluation. Third International Dam World Conference. Setembro de 2018 - Foz do Iguaçu, Brasil. 2018.
- ECKHARDT, R. R. Geração de Modelo Cartográfico aplica ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado / RS. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto - UFRGS 2008.

FCTH. CLiv Software para Simulação de Escoamento em Condutos Livre - Manual do Usuário. 2002.

FCTH. Estudos de Rompimento das Barragens de Caconde, Euclides da Cunha, Limoeiro, Mogi-Guaçu e Água Vermelha. São Paulo: 405 p. 2009.

FCTH. Estudos de Engenharia de Avaliação do Impacto de Cheias nos Rios Cubatão Perequê e Mogi. Volume IV - Estudos Hidráulicos, Relatório Final, São Paulo. 2011.

FCTH. Desenvolvimento de uma metodologia de gestão integrada de riscos associados às emergências em barragens. Relatório Final: Tomo III - Determinação das áreas potencialmente inundáveis, São Paulo. 2018.

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M., 2012, **Avaliação do desempenho de modelos hidráulicos na delimitação da extensão da inundação num trecho do rio Lis.**

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. Comparação do modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. Revista Recursos Hídricos, Vol. 34, Nº 1, 63-73, maio 2013. 2013.

FERNANDEZ, P. A. J. Avaliação do risco de inundação em zonas urbanas com a integração de dados LiDAR e cartografia a escala grande. 2015.

Flood Map: Water Level Map (Beta). 2018. Disponível em: <http://www.floodmap.net/>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

GARAMBOIS, P.-A.; CALMANT, S.; ROUX, H.; PARIS, A. *et al.* Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. **Hydrological Processes**, 31, n. 4, p. 756-767, 2017.

GARCIA, F. R.; ALIXANDRINI JÚNIOR, M. J. Comparação de MDTs a partir do acoplamento de modelo hidrológico e hidrodinâmico aplicado à identificação de áreas de inundações urbanas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15, n. 2, p. 783, 2022.

GARCIA-NAVARRO, P.; ALCRUDO, F.; SAVIRÓN, J. M. 1-D Open-Channel Flow Simulation Using TVD-MacCormack Scheme. ASCE, Vol. 118, N 10 1992.

GOERL, R. F.; CHAFFE, P. L. B.; SPECKHANN, G. A.; MARCEL, P. J. R. G. *et al.* O Modelo HAND como ferramenta de mapeamento de áreas propensas a inundar. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 2017.

HORRITT, M. S. A methodology for the validation of uncertain flood inundation models. **Journal of Hydrology**, 326, n. 1, p. 153-165, 2006.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, 268, n. 1, p. 87-99, 2002/11/01/ 2002.

HUȚANU, E.; MIHU-PINTILIE, A.; URZICA, A.; PAVELUC, L. E. *et al.* Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). **Water**, 12, n. 6, p. 1624, 2020.

HÖHLE, J.; HÖHLE, M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 64, n. 4, p. 398 - 406, 2009.

J, O. C.; E, F. R. **Adh mar Jean Claude Barr  de Saint-Venant**. 2000a. Disponível em: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Saint-Venant.html>. Acesso em: 02 de novembro.

J, O. C.; E, F. R. **Claude Louis Marie Henri Navier**. 2000b. Disponível em: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Printonly/Navier.html>. Acesso em: 02 de novembro.

J, O. C.; E, F. R. **George Gabriel Stokes**. 2003. Disponível em: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Printonly/Stokes.html>. Acesso em: 02 de novembro.

LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: compara o entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009.

LUCCI, R.; MARTINS, J.; MACEDO, E.; SILVA, T. D., 2012, **Avalia o Altimétrica de Modelos Digitais de Eleva o para a Utiliza o em Estudos de Linha D' gua em Canais Naturais**.

LUCCI, R. M.; MARTINS, J. R. S.; BERNARDINO, J. C. D. M.; JÚNIOR, E. C. *et al.* Risk Maps. Third International Dam World Conference. Setembro de 2018 - Foz do Iguaçu, Brasil. 2018.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da barragem do fundo da ruptura com modelos numéricos e hipóteses de simula o**. Orientador: BAPTISTA, M. B. 2017. 159 f. (Mestrado) - Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais.

MACHADO, N. C.; SALIBA, A. P.; BAPTISTA, M. B. Modelagem hidráulica bidimensional de fluídos hiperconcentrados. Estudo de caso da ruptura da barragem do Fundão - Brasil. XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina. 2018.

MARTA, S. Planet imagery product specifications. **Planet Labs: San Francisco, CA, USA**, p. 91, 2018.

MARTINS, J. R. S. Hidráulica Bidimensional. (Disserta o de Mestrado) Programa de p s gradua o em engenharia civil, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1989.

MARTINS, J. R. S. Hidrodinâmica aplicada   modelagem de qualidade das águas superficiais: revisão de processos e métodos. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental 2017.

MIRANDA, A. M. Escoamento Laminar de Fluidos Viscosos: Equações de Navier Stokes. Monografia apresentada ao Curso de Matemática do Campus Catalão, da Universidade Federal de Goiás - UFG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Especialista em Matemática. Universidade Federal de Goiás - Departamento de Matemática 2007.

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, D. L.; CUARTAS, L. A. *et al.* Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 2016.

NASA, N. A. A. S. A. **Navier-Stokes Equations 3-dimensional unsteady**. 2015. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/nseqs.html>. Acesso em: 6 de novembro.

NEVES, E. E.; BEZERRA, Y. S. D. F. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS: UMA ABORDAGEM PRÁTICA E APLICAÇÃO EM PROBLEMAS DE DIFUSÃO TÉRMICA COM MATLAB®. **Revista Cultura e Científica do UNIFACEX**, v. 11, 2013.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L. *et al.* HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent - Nobre - 2016 - *Hydrological Processes* - Wiley Online Library. 2015.

OSSES, J. O método de volumes finitos. ESSS. 2016.

PINOS, J.; TIMBE, L.; TIMBE, E. Evaluation of 1D hydraulic models for the simulation of mountain fluvial floods: a case study of the Santa Bárbara River in Ecuador. **Water Practice and Technology**, 14, n. 2, p. 341-354, 2019.

PORTO, R. D. M. **Hidráulica básica**. 2006. 540 p.

RENNÓ; DALELES, C.; NOBRE; DONATO, A. *et al.* HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, 112, n. 9, p. 3469 - 3481, 2008.

SILVA, A. P. M. Elaboração de Manchas de Inundação para o Município de Itajubá, Utilizando SIG. Dissertação de Mestrado apresentado à Universidade Federal de Itajubá 2006.

SIMIONI, J. P. D. Métodos de Classificação de imagens de satélite para delineamento de Banhados. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Entro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS. GUASSELLI, O. L. A.: 15 p. 2021.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. D. M. **Métodos computacionais em hidráulica**. Salvador: Edufba: 2017. 236 p.

SOUZA, J. A. Implementação de um método de volumes finitos com sistema de coordenadas para a solução acoplada das equações de Navier-Stokes. 2000.

SWAIN, A. K. Bathymetry of Schirmacher lakes as a tool for geomorphological evolution studies. **Geological Society, London, Special Publications**, 461, n. 1, p. 77-93, 2018.

TENG, J.; JAKEMAN, A.; VAZE, J.; CROKE, B. *et al.* Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, 90, p. 201 - 216, 2017.

USACE. HEC-RAS - River Analysis System, Hydraulic Reference Manual Version 5.0. Hydrologic Engineering Center 2016a.

USACE. HEC-RAS: River Analysis System - User's Manual Version 5.0. Davis, CA: United States Army Corps of Engineers 2016b.

USACE. HEC-RAS: River Analysis System - Supplemental to HEC-RAS Version 5.0 User's Manual. Davis, CA: United States Army Corps of Engineers 2018.

VENTURIERI, A.; SANTOS, J. D. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.11.17/doc/INPE-6977.pdf>. Acesso em: Abril 2022.

WEDAJO, G. K. LiDAR DEM Data for Flood Mapping and Assessment; Opportunities and Challenges: A Review. **Journal of Remote Sensing & GIS**, 06, n. 04, 2017-01-01 2017.