

INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE SOBRE EVENTOS DE INUNDAÇÕES A JUSANTE DE UMA BARRAGEM: ESTUDO DE CASO DA PCH PEDRA FURADA – PERNAMBUCO, BRASIL

INFLUENCE OF LAND COVER IN PERMANENT PRESERVATION AREAS ON FLOOD EVENTS DOWNSTREAM OF A DAM: PEDRA FURADA HPP CASE STUDY – PERNAMBUCO, BRAZIL

Ludmilla Freitas PEREIRA, César Gustavo da Rocha LIMA, Mauro Mitsuuchi TASHIMA

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Campus de Ilha Solteira. Alameda Bahia, 550, Ilha Solteira, SP. E-mail: ludmillafreitas@gmail.com; cesar.lima@unesp.br; mauro.tashima@unesp.br

Introdução
Material e métodos
Área de estudo
Dados topográficos
Dados hidrológicos
Determinação das vazões de cheia
Classificação da cobertura do solo
Modelagem hidrodinâmica
Resultados e discussão
Vazão equivalente ao tempo de recorrência de 10 anos
Vazão equivalente ao tempo de recorrência de 10.000 anos
Conclusões
Referências

RESUMO - O presente estudo analisou os efeitos da cobertura do solo das áreas de preservação permanente (APPs) a jusante da barragem da PCH Pedra Furada, no rio Sirinhaém, situada no município brasileiro de Ribeirão – PE, na ocorrência de vazões para tempos de retorno de 10 e 10.000 anos. Foram utilizados dados topobatimétricos e ortofotos cedidos pela empresa proprietária do empreendimento e, também, dados hidrológicos públicos da Agência Nacional de Águas (ANA). Por meio de simulação do modelo hidrodinâmico bidimensional utilizando-se o software HEC-RAS 5.0.7, em regime transiente, variou-se os coeficientes de rugosidade (Manning) das faixas marginais ao rio Sirinhaém, fazendo-se análises em seções distantes a 5, 15 e 25 km da barragem. Os resultados demonstraram que a ocupação dessas APPs por vegetação nativa/arbórea aumentou o coeficiente de rugosidade. Na melhor das hipóteses, proporcionou um aumento de 8 vezes deste coeficiente, reduzindo o tempo de chegada da onda em 2h50 min para o cenário de TR=10 anos e em 2h10min para o cenário de TR=10.000 anos na seção mais distante da barragem. Já para a seção mais próxima, este aumento de rugosidade levou ao acréscimo de profundidades da água de, cerca de, 2 metros dentro da calha do rio, para ambos cenários de vazão. Concluiu-se que APPs bem vegetadas reduzem a altura de lâmina d'água sobre planícies de inundações mais próximas do barramento, além de retardar a chegada da onda em pontos mais distantes, contribuindo com a implementação de ações contingenciais em caso de emergências.

Palavras-chave: Barragem. Cobertura do solo. Coeficiente de rugosidade de Manning. HEC-RAS. Inundação.

ABSTRACT - The present study aimed to analyze the effects of soil cover in Permanent Preservation Areas (PPAs) downstream of the HPP Pedra Furada Dam, in Sirinhaem river in Brazil (Ribeirão-PE), in the occurrence of flows for return periods of 10 and 10,000 years. Field survey data such as orthophotos, topography and bathymetric information were used provided by the company that owns the dam, also public hydrological data from the National Water Agency (Agência Nacional de Águas - ANA). Through the simulation of the two-dimensional hydrodynamic model with the software HEC-RAS 5.0.7, in transient regime, the roughness coefficients (Manning) of the margins of Sirinhaém River were varied, making analyzes in distant sections 5, 15 and 25 km from the dam. The results showed that the occupation of these PPAs by native/tree vegetation increased the roughness coefficient. At best, it provided an 8-fold increase of this coefficient, reducing the time of arrival of the wave in 2h50 min for the scenario of 10-year flood and in 2h10min for the scenario of 10,000-year flood in the most distant section of the dam. For the nearest section, this increase in Manning's value led to an increase in water depth of, approximately, 2 meters inside the river channel, for both flow scenarios. Therefore, it is concluded that well-vegetated PPAs reduce the height of the water depth over flood plains closer to the dam, in addition to delaying the wave's arrival in more distant points, contributing to the implementation of contingency in case of emergency.

Keywords: Dams. Land Cover. Manning roughness coefficient. HEC-RAS. Flood.

INTRODUÇÃO

As barragens são sistemas construtivos com a capacidade de reter água ou qualquer outro líquido, rejeitos e detritos para fins de armazenamento ou controle (CBDB, 2013). Esses empreendimentos são disseminados por todo o planeta Terra e são construídos com

perspectivas que vão além de ganhos financeiros como, por exemplo, garantir o abastecimento de comunidades onde o acesso à água com qualidade é dificultoso.

Dados do Registro Mundial de Barragens (ICOLD, 2020) somam-se 58.713 barragens de

grande porte (barragem com altura igual ou superior a 15 metros, da base mais baixa à crista ou barragem entre 5 e 15 metros, apreendendo mais de 3 milhões de metros cúbicos) já construídas, cujas as principais finalidades são irrigação e geração de energia elétrica.

A medida que eventos críticos foram se desenrolando ao longo dos anos e, consigo, implicando em consequências inestimáveis para o ser humano e o meio ambiente, novos questionamentos regulatórios e sobre padronização de procedimentos de segurança de barragens foram levantados.

Como apontado por Lai & Wang (2017), a operação plena dos vertedouros instalados em barragens constitui-se por si só um risco de inundação para áreas a jusante destas estruturas senão houver controle de fluxo.

Isto porque, as barragens são projetadas para uma probabilidade de ocorrência de acidentes muito baixa, da ordem de 1/10.000, portanto, podem verter, quando necessário, vazões muito altas, como aquelas com período de recorrência decamilenar. Segundo Fadel (2018), compreendendo a relação entre o uso do solo, a probabilidade de ocorrência de eventos extremos e os prováveis danos causados pela cheia, é possível prever o risco de prejuízo e as respectivas medidas mitigatórias.

A identificação de cenários emergenciais decorrentes da operação hidráulica de barragens, por meio da manipulação de softwares e ferramentas computacionais, se tornou um recurso estratégico e bastante difundido atualmente (Lai & Wang, 2017; Teng et al., 2017).

Os modelos numéricos mais aplicados para a simulação do escoamento a jusante de barragens, também chamados de modelos hidrodinâmicos, são baseados na solução das equações de Saint-Venant e Navier-Stokes e passíveis de serem abordados sob perspectivas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (Ballesteros et al., 2011; Teng et al., 2017).

Embora os modelos hidrodinâmicos unidimensionais sejam suficientes para obtenção dos perfis de água e necessitem de um menor tempo de processamento, eles se configuram como

alternativas mais simplificadas, diferentemente dos modelos bidimensionais que são capazes de simular com maior precisão tempos de chegada e duração de inundações em relevos mais complexos (Teng et al., 2017).

Os mapas de inundações hipotéticas devem ser gerados a partir de modelagens hidrodinâmicas bem calibradas e com dados de entrada que sejam apropriados e mais coerentes com a situação real no local do empreendimento. Assim, necessita-se de uma busca constante no aprimoramento de técnicas para sua correta estimativa e, conseqüentemente, na melhoria da gestão de emergências, no resgate e mobilização da população localizada a jusante.

No que concerne à análise de efeitos a jusante de barragens, a importância recai sob o processo de propagação da onda, principalmente sobre efeitos a nível de rugosidade do leito e do armazenamento de terrenos marginais, que levam à possível atenuação da intensidade da cheia (Viseu, 2006).

As áreas de preservação permanente (APP) se referem a uma área de proteção, coberta ou não por vegetação nativa com função de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

Porém, a APP e, principalmente, seu estado quantitativo e qualitativo de recomposição vegetal tem recebido pouca importância técnica ao que se refere ao papel de amenizar efeitos de uma eventual onda de inundação, embora seja sabido que ela tenha influência sobre o comportamento de fenômenos fluviais (Kuroda et al., 2019; Wang et al., 2017).

Neste contexto, o presente estudo objetivou analisar os efeitos da cobertura do solo das áreas marginais ao rio Sirinhaém, a jusante da barragem da PCH Pedra Furada, sobre características de inundações decorrentes de vazões vertidas hipotéticas do empreendimento para tempos de retorno de 10 e 10.000 anos por meio de modelo hidrodinâmico bidimensional com uso do software HEC-RAS 5.0.7 (USACE, 2019).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido considerando a área a jusante da PCH Pedra Furada, localizada em território brasileiro entre os muni-

cípios de Ribeirão e Joaquim Nabuco, estado de Pernambuco. O aproveitamento hidrelétrico está situado no rio Sirinhaém, distando cerca de 91 km da foz no Oceano Atlântico, cujas

coordenadas são 8° 30' 59'' S e 35° 29' 02'' W.

A área de estudo, conforme a figura 1, se inicia no local da barragem (entre Ribeirão e Joaquim Nabuco) e se estende até a região urbana do município de Gameleira que se situa

a, aproximadamente, 28 km do barramento percorrendo-se o curso do rio Sirinhaém. A área, que apresenta 26.75 km², está localizada entre as coordenadas 08°31' S e 08°36' S, e 35°20' W e 35°30' W.

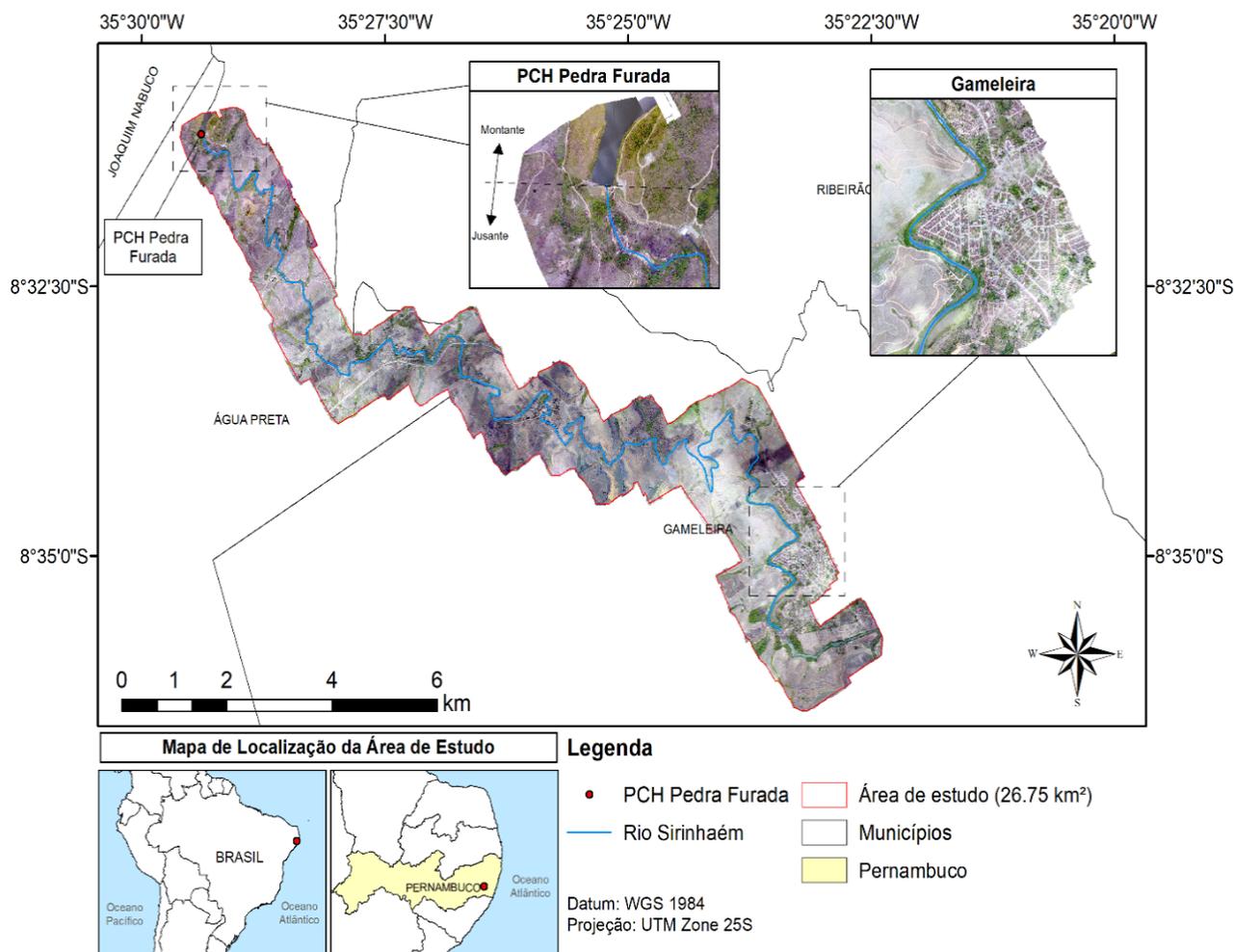


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

A região estudada está inserida na faixa costeira do Nordeste brasileiro, também denominada “Zona da Mata”, cujo clima caracteriza-se segundo a classificação de Köppen & Geiger (1928) como “As” (quente e úmido) com precipitações anuais entre 1.000 e 2.000 mm (valores bem superiores àqueles que ocorrem na região semiárida – média anual de 800 mm). Nesta região, o período chuvoso usualmente inicia-se em março podendo se estender até o mês de agosto (APAC, 2019).

Em junho de 2010 e em maio de 2017, os estados brasileiros Pernambuco e Alagoas viveram eventos hidrológicos extremos, implicando no aumento do nível d’água de rios como o Sirinhaém, Mundaú e Una, provocando inundações e deslizamentos de terra em 68 municípios (dentre os quais cita-se Gameleira).

Na figura 2, a seguir, apresenta-se a bacia hidrográfica contribuinte do empreendimento e a tabela 1, sua respectiva caracterização fisiográfica obtida por meio das ferramentas Spatial Analyst do ArcMap 10.3 (ESRI, 2014).

Dados topográficos

Os dados topobatimétricos que subsidiaram as simulações hidrodinâmicas do presente estudo contemplaram 38 seções levantadas transversalmente ao rio Sirinhaém, a jusante da PCH Pedra Furada, produzindo uma malha de pontos geodésicos definidos com a respectiva profundidade do nível d’água. Esta atividade foi executada por meio de um ecobatímetro monofeixe (Teledyne Odom Hydrographic® Echotrac CVM), com precisão de 0,01 m e alcance máximo de 600 m. Concomitantemente à execução das seções bati-

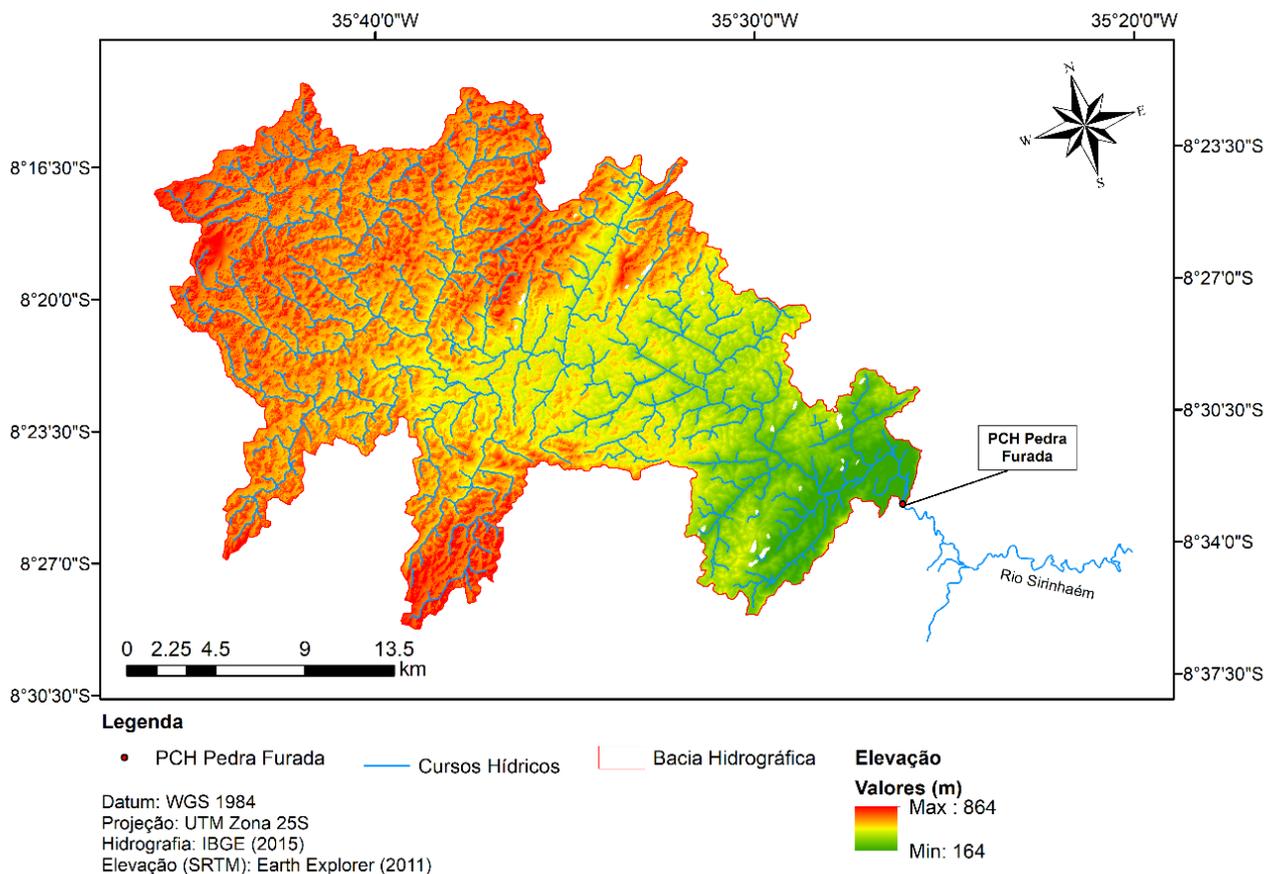


Figura 2 – Mapa hipsométrico com limites da bacia hidrográfica contribuinte do empreendimento.

batimétricas, com a finalidade de georreferenciar os produtos do trabalho de campo, foram coletados dados topográficos da área seca, registrando a posição de pontos em três direções (XYZ) por meio do sistema GNSS RTK Trimble® R4.

Adicionalmente, a equipe de campo realizou um aerolevante com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT), cujo sobrevoo (a uma altura de 200 m) capturou imagens ortoretificadas com resolução espacial de 10,2 cm/pixel.

Este levantamento de campo também produziu curvas de nível com equidistância de 1 metro, a partir das quais criou-se um modelo digital de terreno baseado em uma rede triangular irregular de pontos (TIN – Triangular Irregular Network).

Todos os dados foram levantados em campo em janeiro de 2017 e georreferenciados no Datum WGS 1984, projeção UTM, Zona 25 S.

Dados hidrológicos

Foram utilizados dados hidrológicos provenientes de duas estações de monitoramento fluviométrico constantes no banco de dados

públicos intitulado “Hidroweb” (ANA, 2019), gerido pela Agência Nacional de Águas (ANA). Na tabela 2 apresentam-se as características técnicas destas estações e na figura 3, a localização.

Os dados medidos pela estação Engenho Bento foram utilizados para a estimativa das vazões de cheia que condicionam os cenários hipotéticos de estudo e, também, para a calibração do modelo hidrodinâmico. Já os dados medidos pela estação José Mariano foram utilizados somente nesta última atividade.

Determinação das vazões de cheia

Para efeitos de estimativa dos valores das vazões de cheia para os tempos de retorno de 10 e 10.000 anos, utilizou-se como dado amostral as vazões medidas pelo posto fluviométrico Engenho Bento, sendo o único localizado na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada com dados para esta avaliação. A figura 4 resume o processo utilizado para determinação de vazões de cheia baseado no método direto por análise de frequência de dados fluviométricos.

Tabela 1 – Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada. Fonte: Adaptado de Villela & Matos (1975).

Característica Fisiográfica	Simbologia	Descrição	Equação	Bacia Hidrográfica da PCH Pedra Furada
Área de Drenagem (km ²)	<i>A</i>	Projeção horizontal inclusa entre os divisores topográficos da bacia.	-	549,24
Perímetro (km)	<i>P</i>	Medida do contorno da bacia hidrográfica.	-	200,38
Comprimento Axial da Bacia (km)	<i>L</i>	O comprimento axial da bacia é medido seguindo o curso d'água mais longo desde a desembocadura até a cabeceira mais distante da bacia.	-	63,81
Largura Média da Bacia (km)	<i>B</i>	É obtida dividindo-se a área pelo comprimento da bacia.	$B = \frac{A}{L}$	8,60
Comprimento Total dos Cursos Hídricos (km)	<i>L_t</i>	Somatório dos comprimentos de todos os cursos d'água que compõe a bacia.	-	705
Ordem da Bacia	<i>n</i>	É uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia.	-	9
Altitude Máxima (m)	<i>H_{máx}</i>	Elevação do terreno correspondente ao ponto mais alto do curso hídrico principal.	-	760
Altitude Mínima (m)	<i>H_{mín}</i>	Elevação do terreno correspondente ao ponto mais baixo do curso hídrico principal.	-	168
Coefficiente de Compacidade	<i>K_c</i>	Relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. A tendência a cheias é mais acentuada quanto mais próximo da unidade for este coeficiente.	$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$	2,39
Fator de Forma	<i>K_f</i>	Relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho e com maior fator de forma.	$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$	0,13
Densidade de Drenagem (km/km ²)	<i>D_d</i>	Relação entre o comprimento total dos cursos d'água de uma bacia e sua área total. Varia inversamente com a extensão do escoamento, fornecendo uma indicação da eficiência da drenagem.	$D_d = \frac{L_t}{A}$	1,28
Declividade do rio Sirinhaém (dentro dos limites da bacia)	<i>D</i>	Diferença total de elevação, entre o ponto mais alto e mais baixo do leito, dividida pela extensão do curso d'água entre estes dois pontos.	$D = \frac{(H_{máx} - H_{mín})}{L}$	0,0093

Tabela 2 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo. Fonte: ANA (2019).

Nome	Código Hidroweb	Rio	Município	Latitude	Longitude	Área de Drenagem	Extensão de dados
Engenho Bento	39450000	Sirinhaém	Joaquim Nabuco (PE)	S 8° 29' 49.92"	W 35° 29' 52.08"	537 km ²	1999 a 2018
José Mariano	39430000	Amaragi	Ribeirão (PE)	S 8° 28' 3.00"	W 35° 24' 5.04"	295 km ²	2002 a 2019

Considerou-se o ano hidrológico se iniciando em março, a partir da análise de períodos chuvosos e de estiagens. Em seguida, determinou-se as vazões instantâneas pela Equação 1 de Fuller (1914):

$$Q_{\text{instantânea}} = Q(1 + 2,66A^{-0,3}) \quad (1)$$

onde $Q_{\text{instantânea}}$ é a vazão máxima instantânea

(m³/s), Q é a vazão máxima medida (m³/s) e A é a área da bacia hidrográfica contribuinte da PCH (km²).

As vazões instantâneas foram ajustadas proporcionalmente à área de drenagem do barramento, a partir da multiplicação das vazões instantâneas pela razão entre as áreas de drenagem do posto fluviométrico escolhido e da barragem,

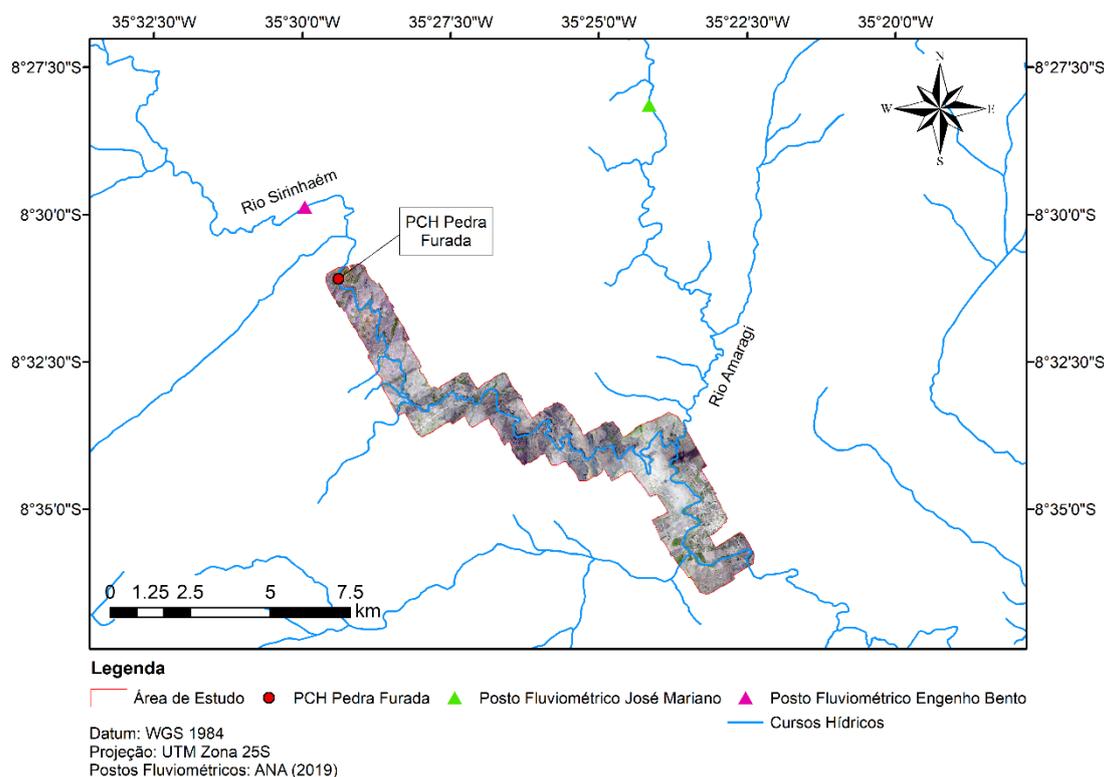


Figura 3 – Mapa com os cursos hídricos principais e localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

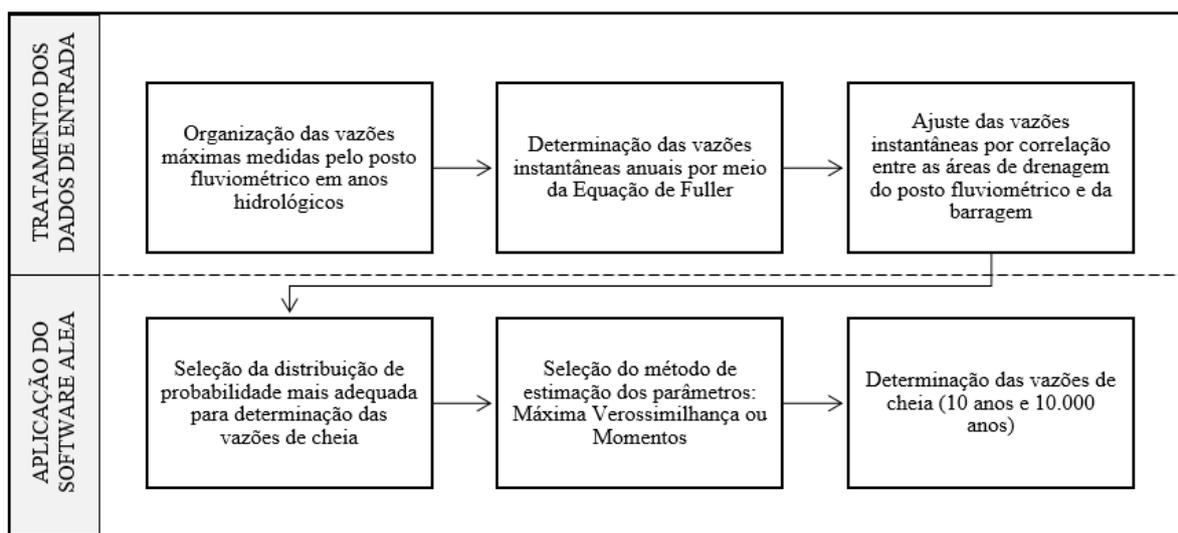


Figura 4 – Fluxograma do processo de determinação das vazões de cheia para diferentes tempos de retorno.

conforme recomendações técnicas (Tucci, 2001; Pereira, 2015).

De posse da série de vazões máximas instantâneas anuais ajustada para o local do empreendimento, realizou-se a determinação das vazões de cheia para dois tempos de retorno (10 e 10.000 anos). Este procedimento foi desenvolvido com o software ALEA – Análise de Frequência Local de Eventos Anuais (De Lima & Naghettini, 2001).

Para fins de cálculo e análise estatística, adotou-se a distribuição de probabilidade de Gumbel e o Método dos Momentos para

estimação dos parâmetros (Eletrobras, 2003; Naghettini & Pinto, 2007). Desta forma, obteve-se vazões iguais a 248 m³/s e 662 m³/s para tempos de recorrência de 10 e 10.000 anos, respectivamente.

Classificação da Cobertura do Solo

A partir das ortofotos coletadas por aerolevantamento com VANT foi realizada a classificação da cobertura do solo utilizando-se o software eCognition® Developer 9 (Trimble, 2014).

A classificação orientada a objeto foi iniciada pela atividade de Segmentação, por meio do algoritmo Multiresolution Segmentation. Este

processo foi repetido até que fossem atingidos fatores de escala adequados (*scale parameter* 500) e que fossem criados agrupamentos significativos de pixels semelhantes (*shape* 0.1 e *compactness* 0.5). Para que esta atividade

fosse executada, foi necessário colher Amostras de Treinamento, a partir do critério de identificação visual de classes de cobertura do solo, conforme a chave de interpretação apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – Chave de interpretação da ortofoto

Classe	Descrição	Identificação
Urbano	Áreas concretadas, pavimentos, residências e edificações, em geral, ou seja, que se constituem por obras antrópicas.	
Água	Corpos hídricos naturais ou artificiais, sejam estes lagos, lagoas, rios, riachos, reservatórios, entre outros.	
Solo Exposto	Áreas, que no momento de captação da imagem, se apresentavam desprovidas de vegetação, referindo-se, como o próprio nome diz, a regiões em que há exposição do solo.	
Vegetação Rasteira	Regiões ocupadas por gramíneas, áreas de pastagens e plantas de pequeno porte de coloração mais clara.	
Vegetação Arbórea	Áreas de florestas, arbustos e com colorações mais intensas devido à densidade frondosa das árvores	

Tendo em vista que a finalidade da classificação era a respectiva atribuição de coeficientes de Manning, foram adotadas as seguintes classes de cobertura: urbano (área construída), água, solo exposto, vegetação rasteira e arbórea.

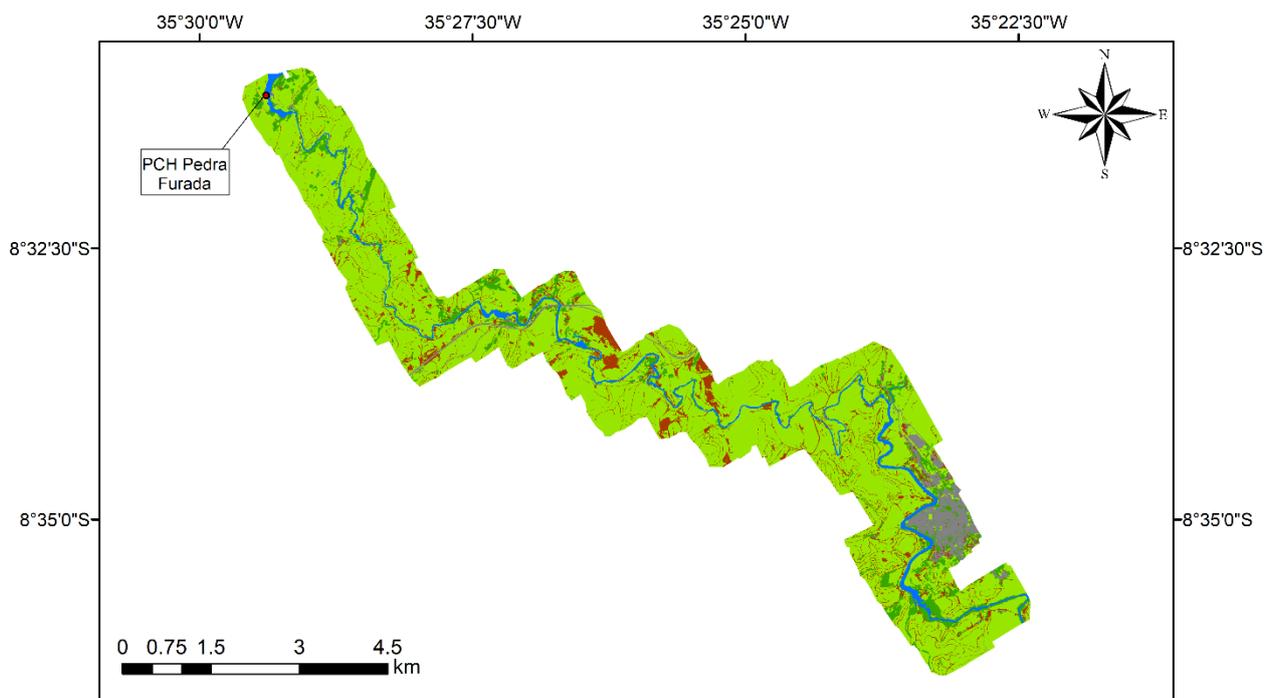
Por fim, utilizou-se o algoritmo Nearest Neighbor para a classificação automática das imagens. Após esta atividade, foi realizada uma etapa de pós-tratamento, manual, para ajuste da classificação automática.

A figura 5 e a tabela 4 apresentam a classificação da cobertura solo para toda a área de estudo.

Como as principais análises deste estudo foram realizadas entre os limites da Área de

Preservação Permanente (APPs), fez-se necessário isolar somente estas faixas marginais, considerando-se 50 metros de largura em cada margem do rio Sirinhaém, tal como estipulado pela Lei Federal n. 12.651, de 25 de maio de 2012 – Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), produzindo-se o mapa da figura 6 e a tabela 5 apresentados, a seguir.

A classificação das imagens foi utilizada para a calibração e adoção dos valores do coeficiente de rugosidade, durante a modelagem hidrodinâmica e, conseqüentemente, na produção de melhores resultados, quando da análise do cenário real da área a jusante da PCH Pedra Furada.



Legenda

- PCH Pedra Furada
- Classificação da Cobertura do Solo**
- Solo Exposto (8.28%)
- Urbano (4.16%)
- Vegetação Arbórea (7.56%)
- Vegetação Rasteira (76.15%)
- Água (3.85%)

Datum WGS 1984
 Projeção UTM Zona 25S

Figura 5 – Mapa da classificação da cobertura de solo para a situação real de toda a área de estudo.

Tabela 4 – Quantificação das classes para situação real de cobertura do solo para toda a área de estudo.

Classe	Área (km ²)	Porcentagem equivalente (%)
Água	1,03	3,85
Solo Exposto	2,22	8,28
Urbano	1,11	4,16
Vegetação Arbórea	2,02	7,56
Vegetação Rasteira	20,37	76,15
Total	26,75	100

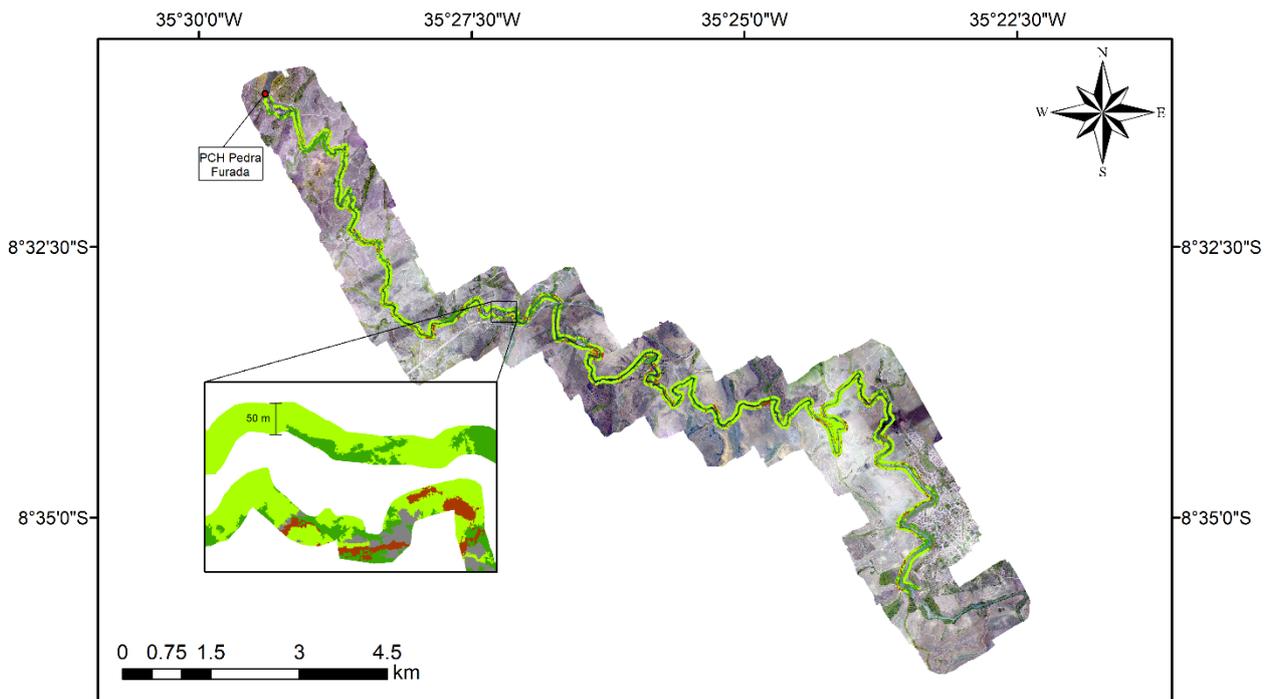
Como as principais análises deste estudo foram realizadas entre os limites da Área de Preservação Permanente (APPs), fez-se necessário isolar somente estas faixas marginais, considerando-se 50 metros de largura em cada margem do rio Sirinhaém, tal como estipulado pela Lei Federal n. 12.651, de 25 de maio de 2012 – Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), produzindo-se o mapa da figura 6 e a tabela 5 apresentados, a seguir.

A classificação das imagens foi utilizada para a calibração e adoção dos valores do coeficiente de rugosidade, durante a modelagem hidrodinâmica e, conseqüentemente, na produção de melhores resultados, quando da análise do cenário real da área a jusante da PCH Pedra Furada.

Modelagem hidrodinâmica

Foi utilizado o software HEC-RAS 5.0.7 (USACE, 2019) para a produção de manchas de inundação para os diferentes cenários hipotéticos estudados. Utilizou-se o modelo de escoamento bidimensional e o conjunto de equações de Ondas de Difusão para executar as simulações pretendidas neste software (USACE, 2016).

A figura 7 apresenta um resumo das atividades desenvolvidas por meio deste modelo hidrodinâmico. Inicialmente, inseriu-se no software HEC-RAS, por meio da ferramenta RAS Mapper, o modelo digital de terreno, em formato raster (resolução espacial de 1 metro), produzido a partir das informações topográficas colhidas em campo



Legenda

- PCH Pedra Furada
- Solo Exposto (8.67%)
- Urbano (2.33%)
- Vegetação Arbórea (17.97%)
- Vegetação Rasteira (70.36%)
- Água (0.66%)

Datum WGS 1984
 Projeção UTM Zona 25S

Figura 6 – Mapa da classificação da cobertura de solo da Área de Preservação Permanente ao longo do Rio Sirinhaém.

Tabela 5 - Quantificação das classes para situação real de cobertura do solo da APP.

Classe	Área APP (km ²)	Porcentagem equivalente (%)
Água	0,02	0,66
Solo Exposto	0,25	8,67
Urbano	0,07	2,33
Vegetação Arbórea	0,52	17,97
Vegetação Rasteira	2,03	70,36
Total	2,89	100

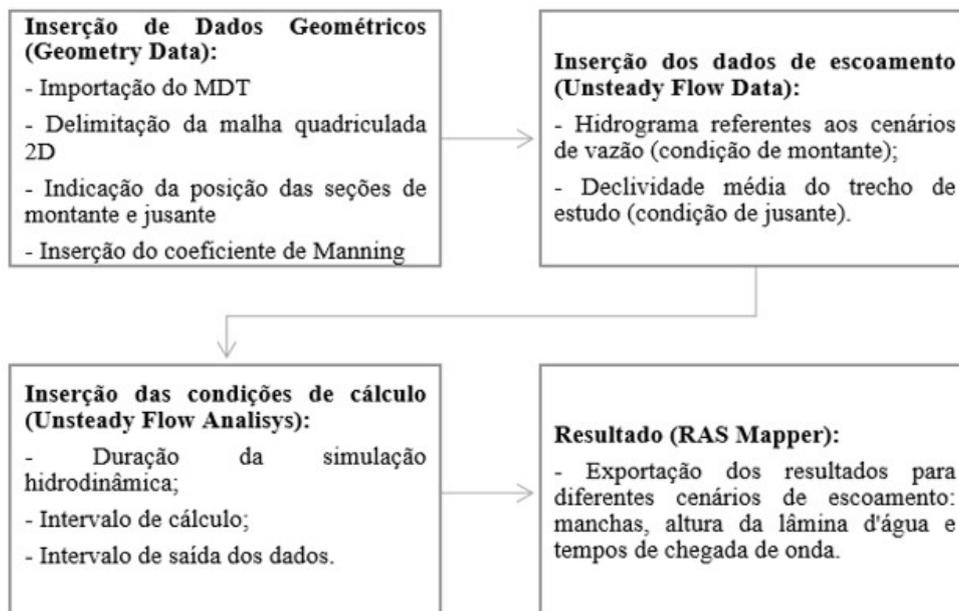


Figura 7 – Fluxograma da síntese das atividades desenvolvidas no HEC-RAS 2D.

Sobre o MDT de referência, delimitou-se uma malha quadriculada com resolução de células de 20

metros, referente à área sobre a qual se deu o escoamento bidimensional (Figura 8 – a).

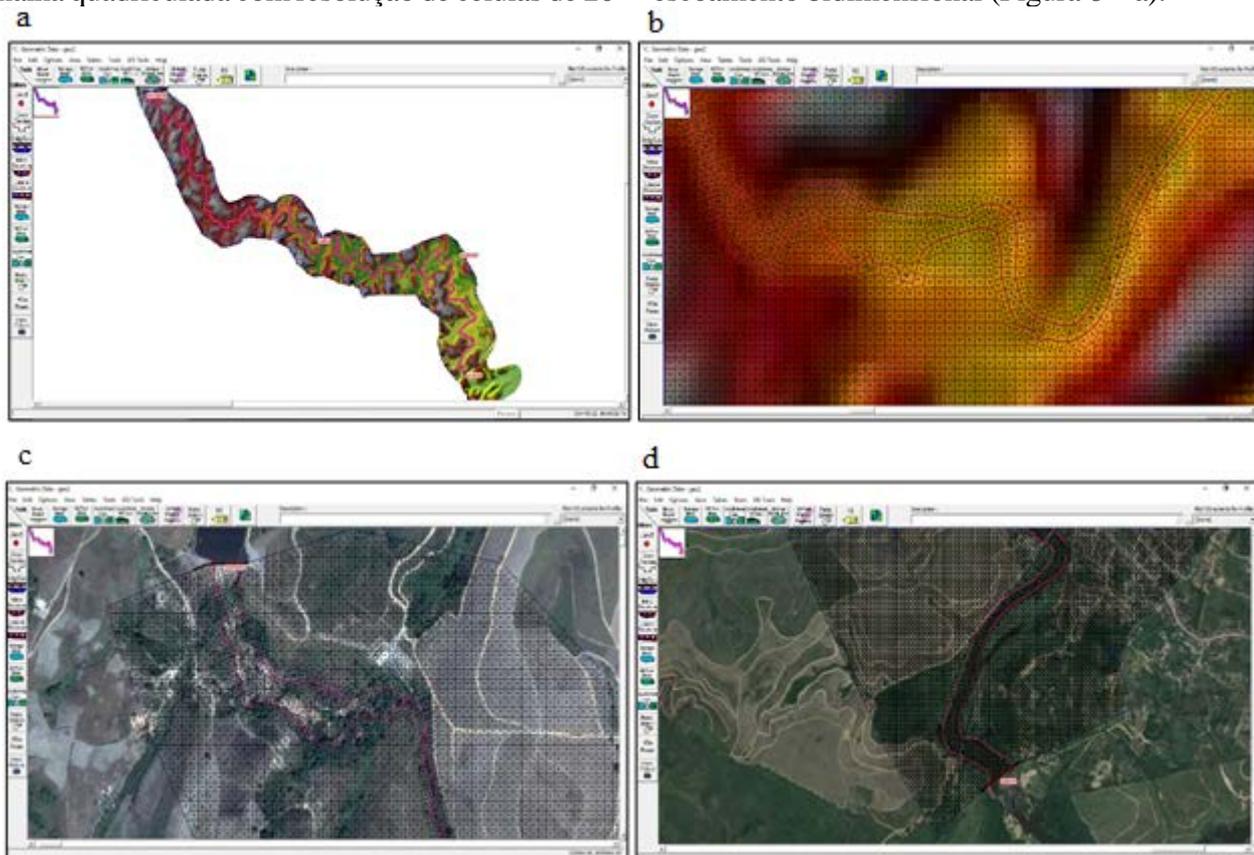


Figura 8 – a) – Malha de escoamento bidimensional com células de 20mx20m. b) Alinhamento das células com as margens do rio para melhor representatividade do relevo. c) BC Line de montante sobre o vertedouro da PCH Pedra Furada. d) BC Line de jusante na seção final da área de estudo.

Ressalta-se que, seguindo recomendações de USACE (2016), de maneira empírica, adotou-se um tamanho de célula considerada adequada para representar as mudanças de relevo, mudanças de coeficientes de rugosidade e orientação correta do escoamento. Além disto, utilizou-se a ferramenta Breaklines para desenhar as margens do rio e assegurar que não houvesse passagem de água para as planícies de inundação até que o nível da água atingisse uma elevação maior do que as faces celulares alinhadas com as margens (Figura 8 – b). Em seguida, foram inseridas as linhas (Boundary Conditions Lines) representativas das seções de montante (entrada de fluxo) e jusante (saída de fluxo) para inserção das condições de contorno sendo elas, respectivamente, os hidrogramas dos diferentes cenários e a declividade média do trecho de estudo (Figura 8 – c e d). Os coeficientes de rugosidade (Manning) foram determinados de acordo com as classes definidas pela atividade de classificação da cobertura do solo da área de estudo.

A partir de duas pesquisas desenvolvidas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2013; CPRM, 2018) foi possível delimitar regiões do

município de Gameleira que foram atingidas pelas cheias naturais excepcionais ocorridas no estado nos anos de 2010 e 2017 (Figura 9).

Como a maioria dos postos fluviométricos e estações telemétricas localizados nos cursos hídricos da região foram danificados ou não efetuaram leituras durante estas cheias, realizou-se uma projeção das vazões ocorridas no rio Sirinhaém e no rio Amaragi (um dos principais afluentes do rio Sirinhaém e que está localizado logo a montante do município de Gameleira) por meio das curvas-chaves das estações Engenho Bento e José Mariano. As curvas-chaves assim como as fichas de campo contendo as leituras das régua limnimétricas instaladas no local das estações fluviométricas foram obtidas por meio da plataforma Hidroweb (ANA, 2019).

A leitura da régua limnimétrica para a estação Engenho Bento, no dia 18 de junho de 2010, foi de 8,47 m, enquanto para o posto José Mariano, 8,64 m. Obtendo-se então, uma vazão de 447 m³/s no local da PCH Pedra Furada e de 318 m³/s na foz do rio Amaragi (que desemboca a montante de Gameleira). Desta forma, realizou-se testes de coeficientes de rugosidades, com o uso

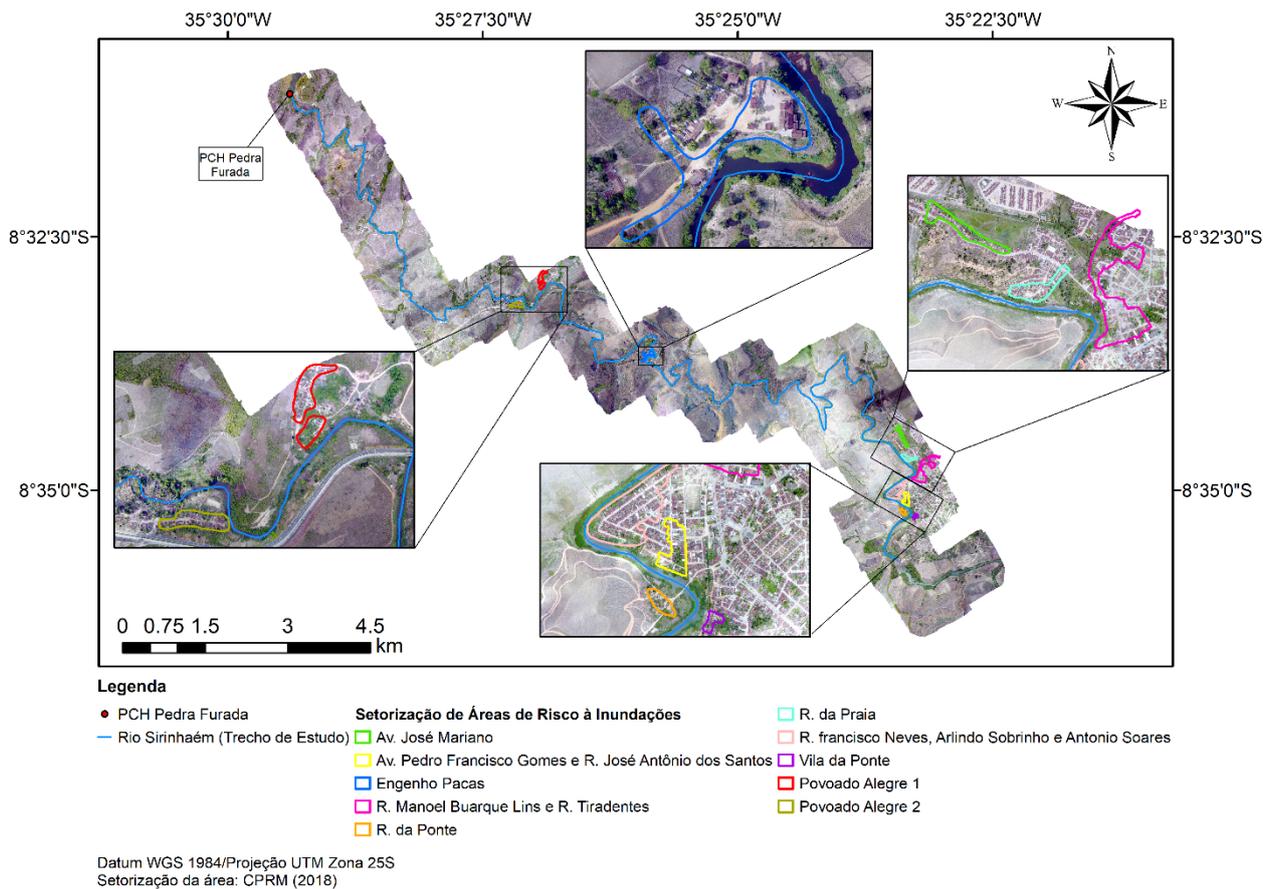


Figura 9 – Mapa dos setores do município de Gameleira atingidas pelas cheias naturais excepcionais nos anos de 2010 e 2017.

do HEC-RAS, por meio do modelo de escoamento não-permanente bidimensional, utilizando-se as vazões extrapoladas pelas curvas-chave e visando obter os valores de altura da lâmina d’água nos

setores catalogados pela CPRM. A referência inicial para os valores de coeficiente de Manning foram encontradas na literatura e são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – Referência inicial de coeficientes de Manning.

Classe	Coefficiente de Rugosidade	Referência Literária
Rio	0,035	Kanashiro (2016)
Vegetação Arbórea	0,10	Viseu (2006), Kanashiro (2016) e Chow (1959)
Vegetação Rasteira	0,050	Viseu (2006), Kanashiro (2016) e Chow (1959)
Solo Exposto	0,020	Eletrobras (2003), Porto (2006) e Chow (1959)
Urbano	0,060	Viseu (2006)

Tabela 8 – Coeficientes de Manning utilizados para diferentes classes de cobertura.

Classe	Coefficiente de Rugosidade
Rio (trecho 1)	0,050
Rio (trecho 2)	0,045
Rio (trecho 3)	0,015
Vegetação Arbórea	0,080
Vegetação Rasteira	0,020
Solo Exposto	0,010
Urbano	0,010

A partir dos valores de coeficientes supracitados, realizou-se inúmeras simulações variando-se cada coeficiente de rugosidade individualmente. Percebendo-se que a variação do coeficiente de

rugosidade da calha do rio afetava os setores sujeitos à inundação de maneira divergente, seccionou-se a calha do rio em três regiões e, para cada uma delas, foi atribuído um valor.

Adotou-se os coeficientes de rugosidade para o cenário da situação real aqueles cuja simulação hidrodinâmica resultou na melhor relação entre os valores de altura de água observados em campo

durantes as cheias (nas casas atingidas) e aqueles obtidos pelo HEC-RAS (Tabela 7).

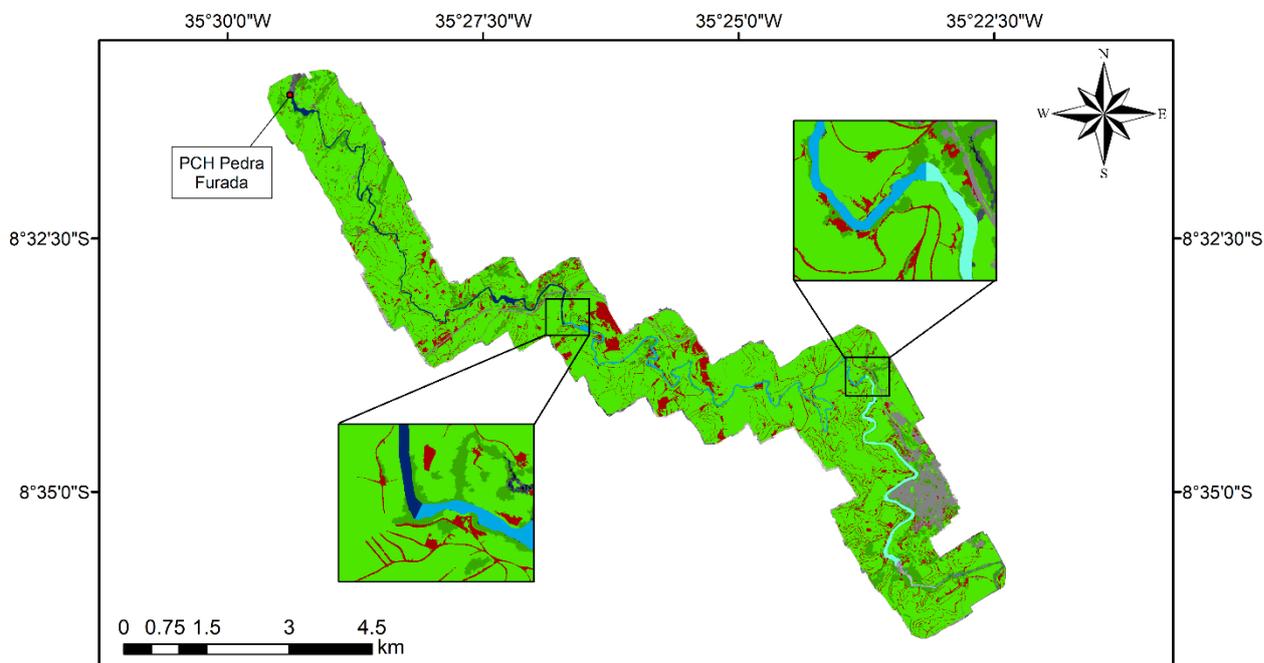
Assim, foram adotados os valores de coeficiente de Manning apresentados na tabela 8 e figura 10.

Tabela 7 – Comparativo entre vazões observadas e simuladas.

Setor	Altura máx. (m) da água observada	Altura máx. da água simulada (m)	Δ_h (m)
Bairro Santa Luzia – Ruas Manoel Buarque e Tiradentes	2,50	2,00	-0,50
Bairro da Lama Avenida José Mariano	0,70	Não atingiu	-0,70
Centro – Ruas Francisco Neves, Arlindo Sobrinho e Antônio Soares	1,70	2,32	0,52
Bairro Nova Gameleira – Rua da Ponte	1,50	0,85	-0,65
Povoado Alegre 1	1,20	1,72	0,52
Povoado Alegre 2	1,80	2,26	0,46
Engenho Pacas	1,90	1,90	0,00

Tabela 8 – Coeficientes de Manning utilizados para diferentes classes de cobertura.

Classe	Coefficiente de Rugosidade
Rio (trecho 1)	0,050
Rio (trecho 2)	0,045
Rio (trecho 3)	0,015
Vegetação Arbórea	0,080
Vegetação Rasteira	0,020
Solo Exposto	0,010
Urbano	0,010



Legenda

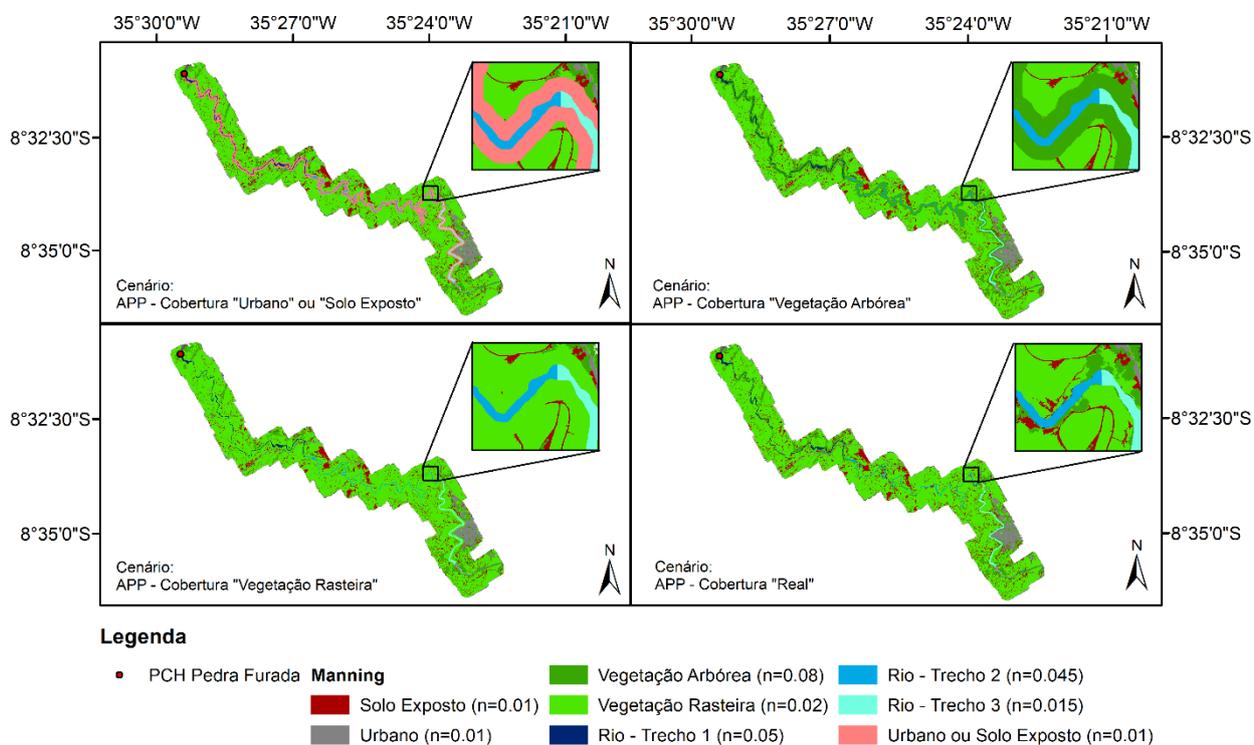
- PCH Pedra Furada
- Manning - Cenário Real
- Vegetação Arbórea (n=0.08)
- Rio - Trecho 2 (n=0.045)
- Solo Exposto (n=0.01)
- Vegetação Rasteira (n=0.02)
- Rio - Trecho 3 (n=0.015)
- Urbano (n=0.01)
- Rio - Trecho 1 (n=0.05)

Datum: WGS 1984
 Projeção: UTM Zone 25S

Figura 10 – Mapa de espacialização dos valores de coeficientes de Manning no cenário real.

Para os cenários hipotéticos de cobertura das Áreas de Preservação Permanente, os coeficientes de Manning referente à estas faixas marginais – 50 metros de largura em cada margem do rio

Sirinhaém – foram variados conforme cada situação de cobertura do solo, isto é: margens totalmente cobertas por vegetação arbórea, vegetação rasteira e solo exposto/áreas urbanizadas (Figura 11).



Datum: WGS 1984
 Projecção: UTM Zone 25S

Figura 11 – Mapa de espacialização dos coeficientes de Manning nos cenários hipotéticos.

Também foi definido o tempo computacional, no HEC-RAS, de 12 segundos, cujo valor foi obtido por meio de testes, onde foram realizadas múltiplas simulações até o momento em que não foram observados sinais de instabilidade na modelagem.

Como condição de contorno a montante da malha de escoamento, foram adotados dois cenários de vazões no trecho de estudo do rio Sirinhaém. O primeiro cenário refere-se à simulação de uma vazão constante partindo do vertedouro da PCH equivalente ao tempo de retorno de 10 anos (248 m³/s) e no segundo cenário,

um tempo de retorno de 10.000 anos (662 m³/s).

Como condição de afluência do rio Amaragi, como o foco do trabalho é o trecho do rio Sirinhaém a jusante da PCH, manteve-se constante o escoamento da vazão média histórica igual a 12 m³/s. Como condição de contorno a jusante (seção final em direção à qual o fluxo escoar) foi utilizada a declividade do rio no trecho de estudo, com o valor médio de 0,0035.

Os resultados finais (dados técnicos e mapas) foram comparados de forma a permitir a discussão sobre a influência do uso e cobertura do solo no alcance da onda de inundação

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vazão equivalente ao tempo de recorrência de 10 anos

Os gráficos apresentados na figura 12 a seguir, ilustram os tempos de chegada de onda e as respectivas profundidades máximas, para cada cenário de cobertura do solo da APP submetidas a uma vazão constante equivalente a um período de retorno de 10 anos, em seções transversais ao rio Sirinhaém distando da

barragem da PCH Pedra Furada 5 km, 15 km e 25 km, respectivamente.

Analisando-se o tempo de chegada da onda da inundação, percebe-se que os efeitos foram se tornando mais evidentes à medida que as seções foram se distanciando da barragem.

Na seção distante 5 km, os tempos de chegada da onda foram bem semelhantes, independentemente da cobertura do solo da APP.

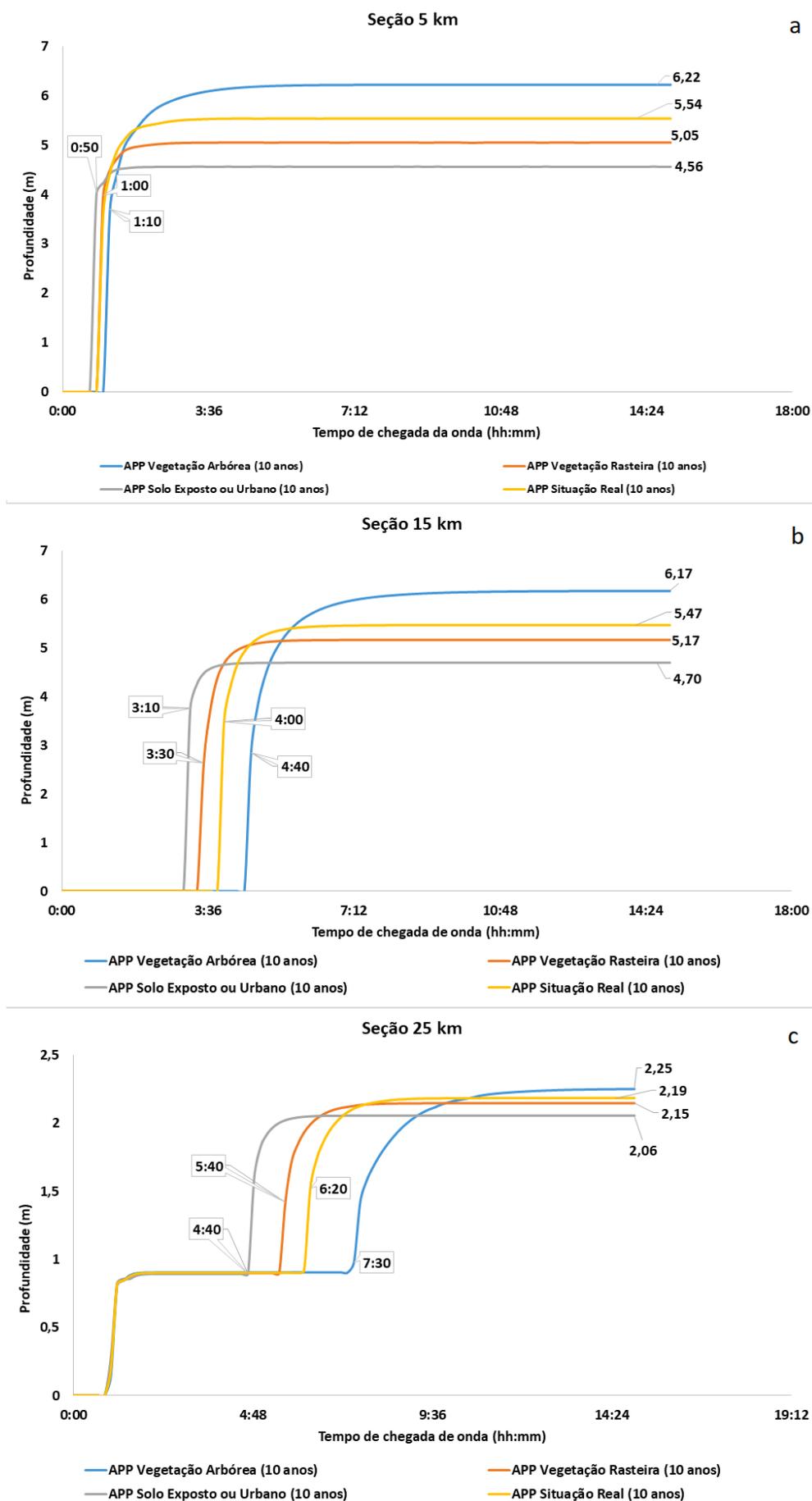


Figura 12 - Gráficos de tempos de chegada de onda e respectivas profundidades máximas submetidas a uma vazão constante equivalente a um período de retorno de 10 anos, em seções transversais ao rio Sirinhaém distando da barragem da PCH Pedra Furada 5 km, 15 km e 25 km.

Enquanto que, para a seção mais distante (25 km), observa-se que a vegetação arbórea provocou um retardo do tempo de 1 h 50 min em relação à hipótese de APP totalmente coberta por vegetação rasteira e de 2 h 50 min em relação à cobertura por solo exposto ou áreas urbanizadas.

Comparando-se com a situação real da ocupação da APP, o cenário de cobertura total por vegetação arbórea provocou um atraso no tempo de chegada de onda de 10 minutos para a seção distante 5 km; de 40 minutos para a seção distante 15 km; e de 1h 10 min para a seção distante 25 km.

Por outro lado, fazendo-se um comparativo da situação real da ocupação da APP com as hipóteses de recobrimento total por vegetação rasteira, solo exposto ou áreas urbanizadas, não foram identificados atrasos no tempo de chegada de onda.

Esta análise se torna de suma importância, quando do planejamento de ações contingenciais, em caso de ocorrências de cheias naturais ou eventuais defluências incrementais provenientes da PCH, principalmente porque a região populosa do município de Gameleira está, aproximadamente, a 27 km da barragem.

Wheater & Evans (2009) discutiram que os rios naturalmente transbordam além de suas margens com uma certa recorrência, cabendo às planícies de inundação as funções de armazenar, atenuar e conduzir o fluxo excedente a jusante. O desenvolvimento urbano e da agricultura sobre estas áreas têm comprometido essa dinâmica natural e potencializado o risco de inundações.

Para o presente estudo, inclusive, se o cenário real de APP apresentado fosse recoberto totalmente por vegetação arbórea, as defesas civis teriam um tempo maior para implementarem suas ações de

evacuação e resgate, em caso de inundações no rio Sirinhaém, garantindo-se a segurança e bem-estar das populações humanas, conforme exigido pelo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012).

Com relação à profundidade d'água a jusante, percebe-se que o aumento do coeficiente de rugosidade da APP devido ao aumento de vegetação nestes locais, contribui para o respectivo aumento da altura da água na calha do rio.

A situação descrita no parágrafo anterior é coerente, uma vez que com o aumento da vegetação na APP, esperava-se que as forças resistivas destas áreas fossem elevadas e, conseqüentemente, contribuíssem para um aumento da lâmina d'água na calha do rio.

No entanto, diferentemente do tempo de chegada da onda, as diferenças entre alturas atingidas pela água são mais evidentes quando se analisa a seção que dista 5 km da barragem em relação às demais.

Na seção mais próxima ao barramento, o aumento de oito vezes do coeficiente de rugosidade da área correspondente à APP coberta com vegetação arbórea provocou um respectivo aumento de 36% da altura da água nesta seção em relação ao cenário de APP coberta por solo exposto ou áreas urbanizadas. Já para seção mais distante do barramento, este mesmo aumento de rugosidade levou à um acréscimo de 9% da altura da lâmina d'água.

Este comportamento, efeitos mais pronunciados sobre a profundidade no primeiro trecho e sobre os tempos de chegada de onda no último trecho, pode ser associado a declividade do talvegue principal de estudo. O primeiro trecho de análise (0-5km) é 12 vezes mais declivoso que o último trecho (15-25km), conforme figura 13.

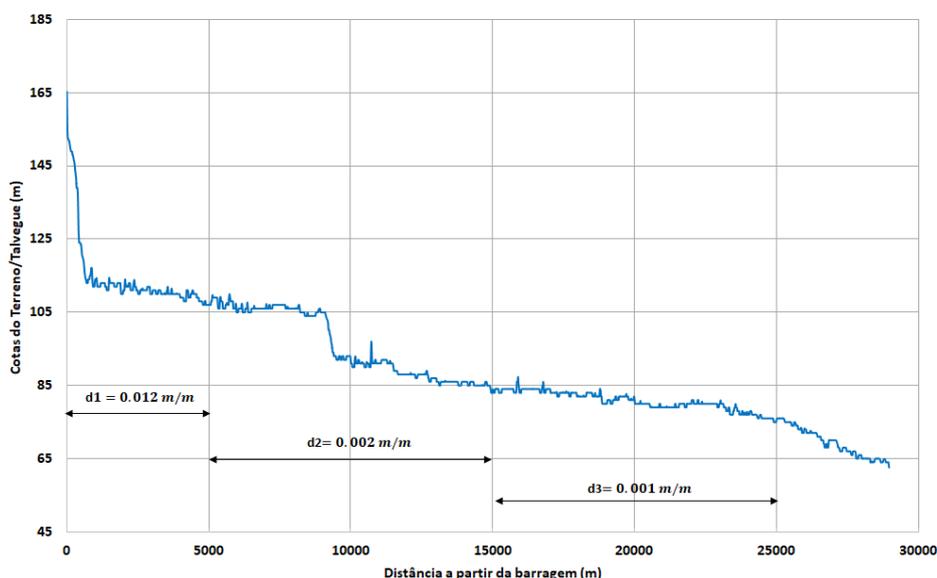


Figura 13 - Perfil longitudinal do trecho de estudo

Vazão equivalente ao tempo de recorrência de 10.000 anos

De maneira análoga ao item anterior, os gráficos ilustrados pela figura 14 a seguir, apresentam os tempos de chegada de onda e as respectivas profundidades máximas, para cada

cobertura do solo da APP submetidas a uma vazão constante equivalente a um período de retorno de 10.000 anos, em seções transversais ao rio Sirinhaém distando da barragem da PCH Pedra Furada 5 km, 15 km e 25 km, respectivamente.

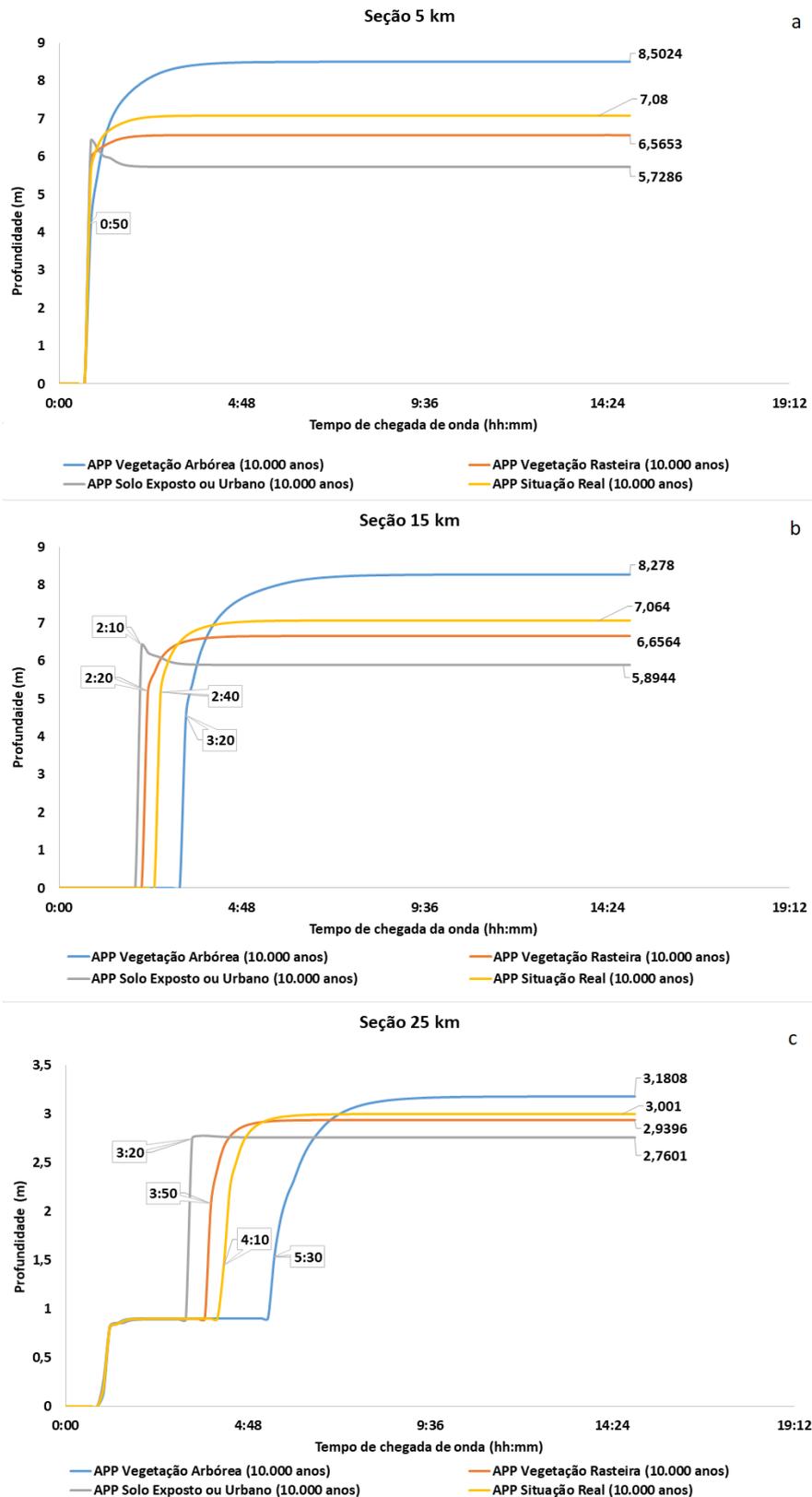


Figura 14 - Gráficos de tempos de chegada de onda e respectivas profundidades máximas submetidas a uma vazão constante equivalente a um período de retorno de 10.000 anos, em seções transversais ao rio Sirinhaém distando da barragem da PCH Pedra Furada 5 km, 15 km e 25 km.

Da mesma forma que o cenário de escoamento anterior, a diferença entre os tempos de chegada de onda, se tornou mais pronunciada à medida que as seções foram se distanciando da barragem.

Para a seção distante 5 km da barragem, o tempo de chegada de onda foi o mesmo para qualquer cobertura da APP (igual a 50 minutos).

Já para a seção de análise mais distante (25 km), próxima ao município de Gameleira, a cobertura da APP por vegetação arbórea provocou um atraso de 1 h 20 min em relação à situação real de cobertura das margens e de 2 h 10 min em relação ao tempo de chegada de onda para uma situação de ocorrências de solo exposto ou áreas urbanas.

Na seção de análise mais próxima ao barramento (5 km), o aumento de oito vezes do coeficiente de rugosidade da área correspondente à APP coberta por vegetação arbórea provocou um respectivo aumento de 48% da profundidade da água nesta seção em relação ao cenário de APP coberta por solo exposto ou áreas urbanizadas. Já para seção de análise distante 25 km da barragem, este mesmo aumento de rugosidade levou à um acréscimo de 15% da

altura da lâmina d'água.

Nas seções de 5 km e 15 km, identificou-se a ocorrência de uma inflexão no gráfico para o cenário da APP coberta totalmente por solo exposto ou áreas urbanas. Isto não ocorreu no cenário simulado anteriormente para uma vazão inferior, para tempo de retorno de 10 anos.

Esta inflexão, decorrente da variação abrupta da altura da lâmina d'água e, portanto, resultante de um pico de vazão, está relacionada ao menor amortecimento e infiltração do escoamento devido à menor ou nenhuma cobertura das margens do rio, conforme já abordado em outros trabalhos de mesmo cunho (Gao et al., 2016; Wheater & Evans, 2009).

O comportamento das características da inundação para o cenário de escoamento para uma vazão com recorrência de 10.000 anos, apresentou a mesma tendência obtida para o cenário correspondente à vazão com tempo de recorrência de 10 anos, no que tange ao retardo dos efeitos a jusante e redução de alturas de lâmina d'água nas margens. Confirmando-se assim, o caráter de boa prática de reflorestamento destas faixas marginais.

CONCLUSÕES

Por meio da aplicação do modelo hidrodinâmico bidimensional HEC-RAS e simulando-se dois cenários de escoamento (TR=10 anos e TR=10.000 anos), concluiu-se que o aumento da presença de vegetação, principalmente arbórea, nas faixas marginais de cursos hídricos, neste estudo entendidas como Áreas de Preservação Permanente, auxilia na redução do tempo de chegada de onda em regiões do vale a jusante.

Esta inferência é de grande valia para o planejamento de ações de resgate e mobilização da população quando da ocorrência de cenários emergenciais de inundações, criando-se um intervalo de tempo maior para execução.

Neste estudo, um aumento da rugosidade da APP de 0.01 para 0.08, ou seja, oito vezes, provocou uma redução do tempo de chegada de onda em 2h50 min para o cenário de vazão TR = 10 anos e de 2h10min para o cenário de vazão

TR=10.000 anos na seção distante 25 km da barragem. Ademais, para áreas mais próximas da barragem analisada, determinou-se que, independentemente da cobertura da APP, pelo menos até uma distância de 5 km, as vazões simuladas chegaram com tempos similares.

Com relação à altura máxima atingida pela água, em ambos os cenários de vazões, os efeitos foram mais pronunciados na seção distante 5 km da barragem, onde o aumento de oito vezes da rugosidade da APP levou ao acréscimo de, aproximadamente, 2 metros de altura da lâmina d'água dentro da calha do rio.

Assim, entende-se que APPs bem vegetadas auxiliam na redução das consequências sobre as planícies de inundações, além de contribuírem no retardo do tempo de chegada da onda, caracterizando-se como uma boa contribuição para o rol de elementos de segurança de barragens.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Portal HIDROWEB**. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 30/11/2019.

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Plano Estadual de Recursos Hídricos – Volume I. [S.

l.: s.n., 200-]. Disp. em: http://www.sirh.srh.pe.gov.br/apac/pagina.php?page_id=3&subpage_id=82. Acesso em: 28/12/2019.

BALLESTEROS, J.A.; BODOQUE, J.M.; DíEZ-HERRERO, A.; SANCHEZ-SILVA, M.; STOFFEL, M. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. **Journal of**

- Hidrology**, v. 403, n. 1-2, p. 103-115, 2011.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Ano CXLIX, n. 102, 28 maio 2012. Seção 1, p.1. Disp. em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm. Acesso em 2/5/2021.
- CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS. Apresentação das barragens. [S. l.: s.n., 200-]. Disp. em: <http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%20a7%20c3%a3o%20das%20Barragens>. Acesso em: 30/06/2019.
- CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 680 p., 1959.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa (Gameleira – Pernambuco)**. 2013. p. 13. Disp. em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19956.1>. Acesso em: 30/06/2019.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações (Gameleira – Pernambuco)**. 2018. p. 40. Disp. em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19956>. Acesso em: 30/06/2019.
- DE LIMA, A.A.; NAGHETTINI M. **Análise de frequência de eventos anuais- ALEA**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2001. Disp. em: <http://www.ehr.ufmg.br/downloads/>. Acesso em: 9/09/2019.
- ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Crítérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 279 p., 2003.
- ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcMap 10.3**. Redlands: ESRI, 2014.
- FADEL, A.W.; MARQUES, G. F.; GOLDENFUM, J. A. Mapeamento do risco de prejuízo como medida de gestão e adaptação às inundações. **Geociências**, v. 37, n. 1, p. 121-136, 2018.
- FULLER, W. E. Flood flows. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 77, n. 1, p. 564 – 617, 1914.
- GAO, J.; HOLDEN, J.; KIRKBY, M. The impact of land-cover change on flood peaks in peatland basins. **Water Resources Research**, v. 52, p. 3477-3492, 2016.
- ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **World register of dams: updated April 2020**. Disp. em: http://www.icold-cigb.net/GB/world_register/world_register_of_dams.asp. Acesso em: 30/12/2020.
- KANASHIRO, W. H. **Curso de segurança de barragens: módulo I - barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais**. Unidade 6: noções de hidráulica. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas - ANA, 2016. Disp.l em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/110>. Acesso em: 30/06/2019.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlagcondicionadas. Justus Perthes.n.p. 1928.
- KURODA, N.; HIRAO, S.; ASAEDA, T. Dynamic modeling of the interaction of riparian vegetation with floods and application to vegetation management. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 30, p. 14-24, 2020.
- LAI, X. & WANG, Z. Flood management of Dongting Lake after operation of Three Gorges Dam. **Water Science and Engineering**, v. 10, n. 4, p. 303-310, 2017.
- NAGHETTINI, M; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 552 p., 2007.
- PEREIRA, G. M. **Projeto de usinas hidrelétricas: passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 520 p., 2015.
- PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC/ USP, 2006.
- TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 90, p. 201-216, 2017.
- TRIMBLE-TRIMBLE GERMANY GBMBH. **eCognition Developer 9**. Munich: TRIMBLE, 2014.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 943 p., 2001.
- USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS 5.0.7**. Davis: Hydrologic Center Engineering, 2019. Disp. em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>. Acesso em: 16/03/2021.
- USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS river analysis system 2D modeling user’s manual**. Davis: Hydrologic Center Engineering, 2016.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245 p., 1975.
- VISEU, M. T. **Segurança dos vales a jusante de barragens: metodologias de apoio à gestão do risco**. Lisboa, 2006. 420 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- WANG, B.; CHEN, Y.; WU, C.; PENG, Y.; SONG, J.; LIU, W.; LIU, X. Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures. **Journal of Hydrology**, v. 562, p. 692–702, 2018.
- WHEATER, H. & EVANS E. Land use, water management and future flood risk. **Land Use Policy**, v. 26, p. 251-264, 2009.

*Submetido em 2 de maio de 2021
Aceito para publicação em 25 de julho de 2022*