Recital
Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG.

MAPAS DE INUNDAÇÕES PARA UM VALE URBANO: ESTUDO DE CASO NO TRECHO DO CANAL DA AV. CARLOS DRUMMOND DE ANDRADE, MUNICÍPIO DE ITABIRA / MG

Flood maps for an Urban Valley: Case study in a section of the Av. Carlos Drummond de Andrade channel – municipality of Itabira / MG

Felipe Angelo Neves CAMPERA
Universidade Federal de Minas Gerais
felipecampera@terra.com.br

Juni CORDEIRO
Universidade Federal de Minas Gerais
juni.scordeiro@gmail.com

Paulo Marinho de OLIVEIRA
Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
paulo.oliveira@ifnmg.edu.br

DOI: https://doi.org/10.46636/recital.v3i3.201

Resumo

A utilização de mapas de inundação para previsão no planejamento urbano é fundamental atualmente. Nesse contexto, dados os recursos disponíveis por meio de ferramentas SIG integradas aos modelos hidráulicos como HES-RAS, torna-se possível a geração de mapas de eventos pluviométricos extremos com maior fidedignidade. O presente estudo apresenta uma metodologia comumente utilizada por meio de um modelo hidráulico (HEC-RAS) acoplado a uma ferramenta de SIG para geração de um modelo simples de elevação do terreno. As chuvas extremas são geradas de diferentes formas, neste estudo foi adotada a abordagem das relações

Intensidade-Duração-Frequência (IDF) constantes do *software* Plúvio. Portanto, para tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, foram elaborados os mapas de inundações para o estudo de caso da Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira – MG. A metodologia é padronizada, podendo ser executada em demais regiões constantes de estudos hidrológicos apropriados e com informações refinadas do terreno. Os resultados permitiram especializar os cenários de inundações na região de estudo, e, ainda, fomentando uma avaliação socioeconômica de danos potenciais.

Palavras-chave: Mapa de Inundação. Modelagem Hidrológica. Manchas de Inundação.

Abstract

The use of flood maps for the prediction of urban planning is essential nowadays. In this context, given the resources available through GIS tools integrated with hydraulic models such as HEC-RAS, it is possible to generate maps of extreme rainfall events with greater reliability. The present study presents a methodology widely used by means of a hydraulic model (HEC-RAS) coupled to a GIS tool to generate a simple terrain elevation model. Extreme rains are generated in different ways. In this study, the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves in a software called Plúvio were considered. Therefore, for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years, flood maps were prepared for the case study of Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira – MG. The methodology is standardized and can be performed in other regions included in appropriate hydrological studies and with refined information on the terrain. The results allowed for the specialization of flood scenarios in the study region, and also fostered a socioeconomic assessment of potential damage.

Keywords: Flood Map. Hydrological Modeling. Flood Spots.

INTRODUÇÃO

Os estudos envolvendo machas de inundação são bastante pesquisados atualmente, uma vez que fornecem subsídio à administração pública para o planejamento urbano e correção de falhas nas políticas de uso e ocupação do solo.

Ainda, acima da ótica da análise física do fenômeno de enchente é possível estabelecer o contexto social e até econômico dos eventos. O contexto social está ligado aos prejuízos como perda de vidas. Neste sentido, encontra-se disponível o *software* HEC-*LifeSim*, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), sendo capaz de quantificar e otimizar essa vertente do evento de cheia. Por fim, no cenário econômico, cada profundidade da mancha de indução está atrelada a um prejuízo financeiro para um setor específico de uso e ocupação do solo da região analisada (BLAGOJEVIĆ *et al*., 2019).

Correia, Ribeiro e Baptista (2015) trabalharam com regiões susceptíveis às inundações na bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo – Rio de Janeiro. O estudo destacou a variação das margens de leito menor, maior e planícies de inundação, associadas aos eventos extremos de Tempo de Retorno (TR) de 10, 20 e 50 anos.

Para apresentação da metodologia de geração dos mapas de inundação associados aos eventos extremos, será abordado o vale da Av. Carlos Drummond de Andrade, no município de Itabira, no estado de Minas Gerais.

1 REFERENCIAL TEÓRICO – ESTUDOS SIMILARES

Marinho e Silva (2016) abordaram a identificação de áreas sujeitas às inundações por meio de análise morfométrica na região urbana do município de Manaus, no estado do Amazonas. A partir de registros pretéritos da defesa civil local e cruzamento das informações de vales propícios, os autores detectaram locais com alto índice de risco a enchentes. Contudo, uma análise mais completa também pode ser realizada por meio da geração de chuvas extremas em modelos específicos e processamento hidráulico em softwares apropriados (ONGDAS *et al*., 2020).

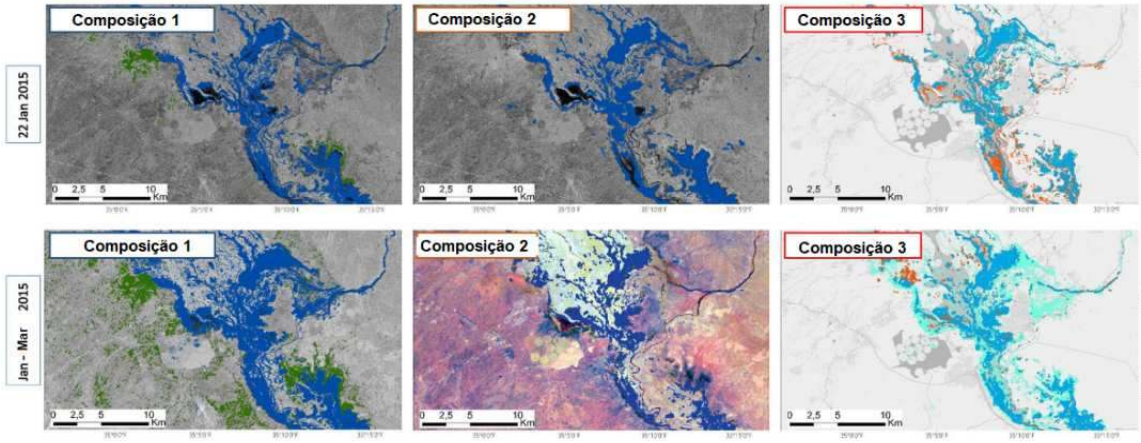
Ongdas *et al*. (2020) utilizaram o modelo hidráulico HEC-RAS, desenvolvido pelo USACE, para comparação das manchas de inundação pelo critério de profundidade alternando-se a malha de cálculo. Os autores obtiveram os mapas para os eventos extremos de 10, 20 e 100 anos de tempo de retorno.

A literatura apresenta diversas metodologias para obtenção das regiões e valores de profundidade alcançados por eventos pluviométricos críticos. Nesse sentido, o estudo de Amitrano *et al*. (2018) executou o mapeamento rápido das regiões inundáveis a partir de imagens *raster* do satélite *Sentinel*-1. Os autores trabalharam com algoritmo multiobjetivo capaz de prever as regiões prováveis, entretanto, não foram gerados neste estudo os dados hidrológicos de entrada dos eventos extremos pluviométricos.

Periçato, Silva e Marcatto (2011) utilizaram dados históricos aliados aos recursos de uma plataforma de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para obtenção das regiões propícias às inundações no município de Itajaí, no estado de Santa Catarina. A análise temporal utilizada pelos autores demonstrou um recurso interessante para obtenção das regiões de interesse críticas.

Neste contexto, a partir de séries históricas, mas pelo abrangente conceito de *Big Data*, Cian, Marconcini e Ceccato (2018) utilizaram imagens de satélite disponíveis, trabalhando com o conceito de análise temporal da plataforma *Google Earth Engine*, aplicadas à cidade de Bangula, em Malawi. A Figura 1 apresenta a análise global do evento, dada magnitude de extração da informação por imagens de satélite, por composição espectral e na série temporal para região de estudo (CIAN; MARCONCINI; CECCATO, 2018).

Figura 1 - Análise temporal de inundações por composição espectral - Cidade de Bangula, Malawi.



Fonte: Adaptado de Cian, Marconcini e Ceccato (2018).

A partir dos trabalhos apresentados, nota-se que não há uma metodologia única para obtenção dos mapas de inundação para uma região de interesse, seja em escala macro ou micro a partir do referencial de danos. Ademais, a literatura traduz o uso de estudos hidrológicos atualizados, ou seja, com geração de eventos extremos pluviométricos para, em sequência, alimentar o programa de modelagem hidráulica apropriado (NAGHETTINI *et al*., 2007).

Como possibilidade de estudo nesse ramo de pesquisa, Kienberger (2014), utilizou técnicas de manchas participativas com a população de Munamicua, distrito de Búzi, em Moçambique. Os critérios para elaboração de regiões críticas sujeitas às inundações são bastante discutidos, pela participação e coleta de informações através da variável humana. Entretanto, dada carência de informações, é um recurso utilizado em algumas regiões do globo.

Righi e Robaina (2013) estabeleceram zoneamentos para localidade associados aos níveis de riscos de enchentes. Destaca-se, contudo, que, apesar de analisarem séries temporais, a região por eles estudada (Rio Uruguai, estado do Rio Grande do Sul, próximo ao município de São Borja) possui registros fluviométricos.

Finalmente, utilizando dados hidrológicos e modelagem hidráulica de eventos extremos, Alves e Andrade (2019) trabalharam com *software* Plúvio 2.1 para estabelecimento das relações IDF para chuvas de referência e, em sequência, propagação da cheia pelo modelo hidráulico HEC-RAS 5.0.0. Os autores estabeleceram manchas de inundação para o Rio Bananeiras, localizado no município de Conselheiro Lafaiete, no estado de Minas Gerais. Os TR`s analisados pelos autores foram de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Observa-se, portanto, uma maior utilização dos modelos hidrológicos apropriados para posterior análise hidráulica em um programa secundário a partir de informações extraídas de uma plataforma SIG. Nesse sentido, reforçando tal conjunto, destaca-se também o trabalho de Reis (2015) que utilizou o modelo HEC-RAS para o Córrego Rangel, na cidade de Patrocínio, em Minas Gerais para previsão dos mapas de enchentes.

2 METODOLOGIA

No contexto atual, diversas metodologias são utilizadas para geração de mapas de inundação, como exemplificado pela literatura destacada no item precedente. Contudo, visando-se estabelecer um roteiro para demais regiões brasileiras, com similaridade para as características geomorfológicas, hidrológicas e hidráulicas na região do canal urbano para Av. Carlos Drummond de Andrade no município de Itabira, descreve-se o procedimento seguinte.

Para geração das manchas de inundação de eventos extremos, associados aos TR`s de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, trabalhou-se com a subdivisão da modelagem final acoplada em dois grupos, modelagem hidrológica e modelagem hidráulica, que são unidos no modelo final.

A primeira etapa, modelagem hidrológica, consiste em geração das chuvas extremas, por meio de curvas ajustadas por TR para localidade desejada. Para isso, trabalhou-se com os dados do *softwar*e Plúvio. O programa livre, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), apresenta regionalização de dados para diversas regiões e municípios brasileiros. Portanto, para geração dos hidrogramas finais por TR, que foram propagados na fase seguinte de modelagem hidráulica, trabalhou-se com o *software* HEC-HMS versão 4.2.1, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE). Como entrada para o modelo hidrológico no HEC-HMS, necessitou-se do levantamento das características fisiográficas das sub-bacias de contribuição ao vale da Av. Carlos Drummond de Andrade, como *Curve-Number* (coeficiente associado à permeabilidade do tipo e uso do solo) e dados geomorfológicos (declivade equivalente e comprimento dos talvegues).

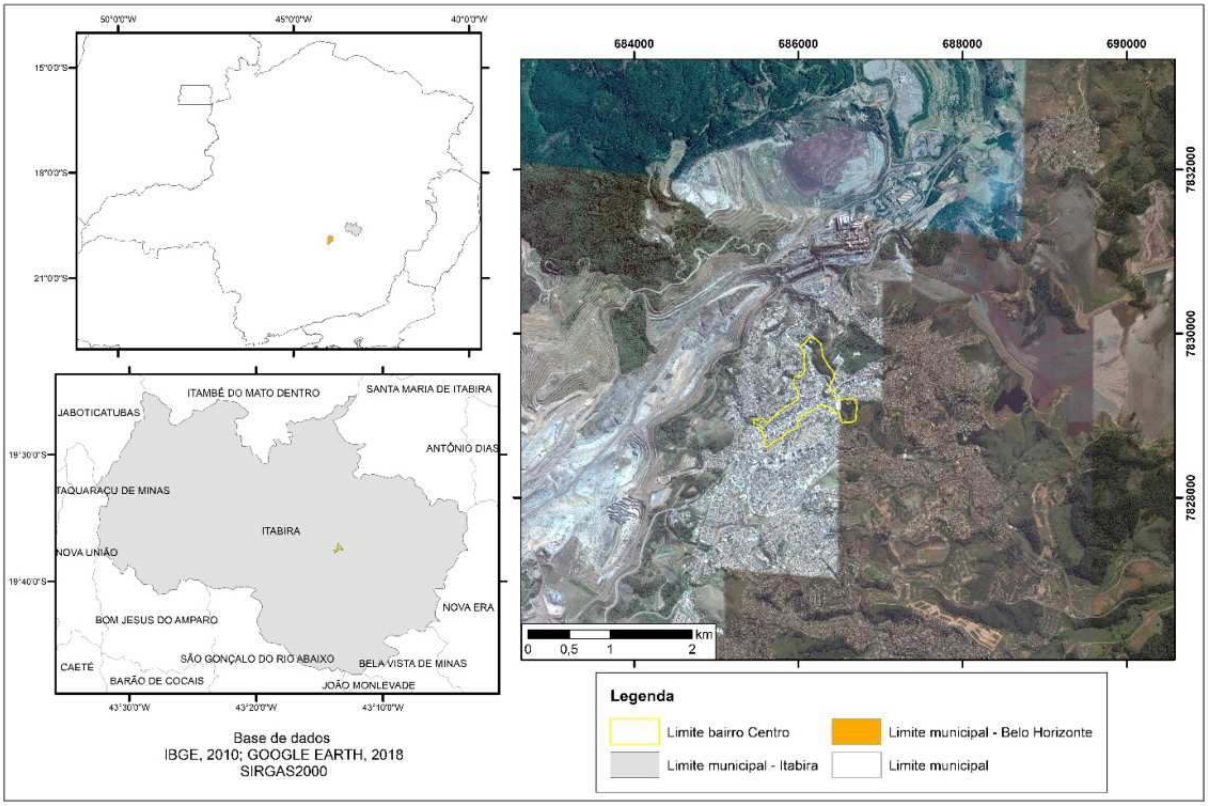
Por fim, como modelo final acoplado, unindo-se a segunda parte denominada modelagem hidráulica com a modelagem acoplada (hidrológica e hidráulica), trabalhou-se com modelo HEC-RAS versão 5.0.5, também desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE). Trata-se do lançamento físico dos hidrogramas, gerados pela primeira parte (modelagem hidrológica), no talvegue real da Av. Carlos Drummond de Andrade. Para tanto, trabalhou-se com imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), utilizadas para interpolação e criação de uma rede triangular irregular (*Triangulated Irregular Network* - TIN) para representação do terreno em estudo. Portanto, propagando-se os hidrogramas no modelo acoplado final, tornou-se possível visualizar os mapas de inundação para cada TR de interesse.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O município de Itabira está localizado na porção centro-leste do estado de Minas Gerais, a nordeste do Quadrilátero Ferrífero e a oeste de Belo Horizonte, capital do estado (Figura 2).

Figura 2 – Localização do Município de Itabira e Região de Estudo.



Fonte: Modificado de Prefeitura Municipal de Itabira, 2008; IBGE, 2010; *Google Earth*, 2018.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município possui uma população estimada, em 2018, de 119.186 pessoas, área de 1.253,704 km² e uma densidade demográfica de 87,57 hab/km² (IBGE, 2018).

O município possui 92% de domicílios com esgotamento sanitário adequado; 25,2% de domicílios urbanos em vias públicas contendo arborização e 62,4% de domicílios urbanos em vias públicas caracterizados por uma urbanização adequada, contendo bueiro, pavimentação, calçada e meio-fio (IBGE, 2018).

A área central da cidade de Itabira é caracterizada pela presença de cursos d'água canalizados (seções abertas e fechadas), o que tem levado a episódios de cheia nestes canais (Figura 3 A e B).

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v.3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

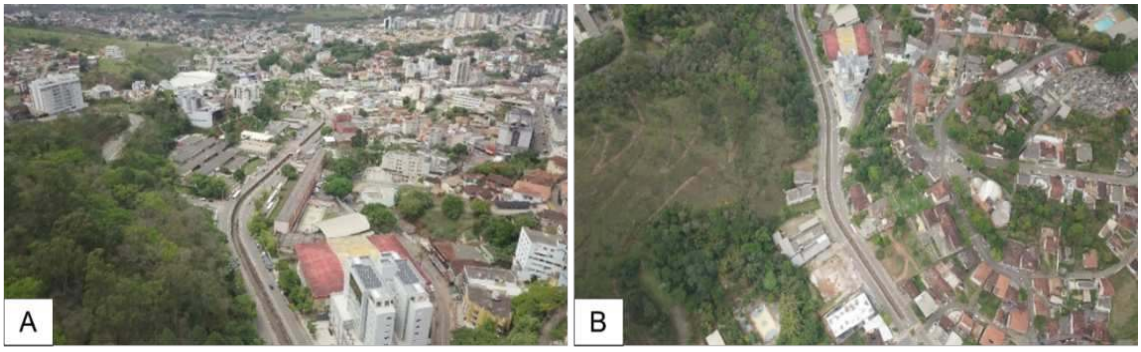
Figura 3 – (A) Detalhe do canal ao longo da Av. Carlos Drummond de Andrade, (B) Detalhe do Canal ao longo da Av. Carlos de Paula Andrade, fevereiro 2018.



Fonte: (A) Notícias Uai, 2015; (B) Fatos de Minas, 2018.

Assim, o trecho selecionado para este trabalho corresponde ao curso d'água canalizado ao longo da Av. Carlos Drummond de Andrade (Figura 4 A e B), com extensão de 1,7 km, que drena uma bacia hidrográfica com área de 2,98 km^2 (Figura 5).

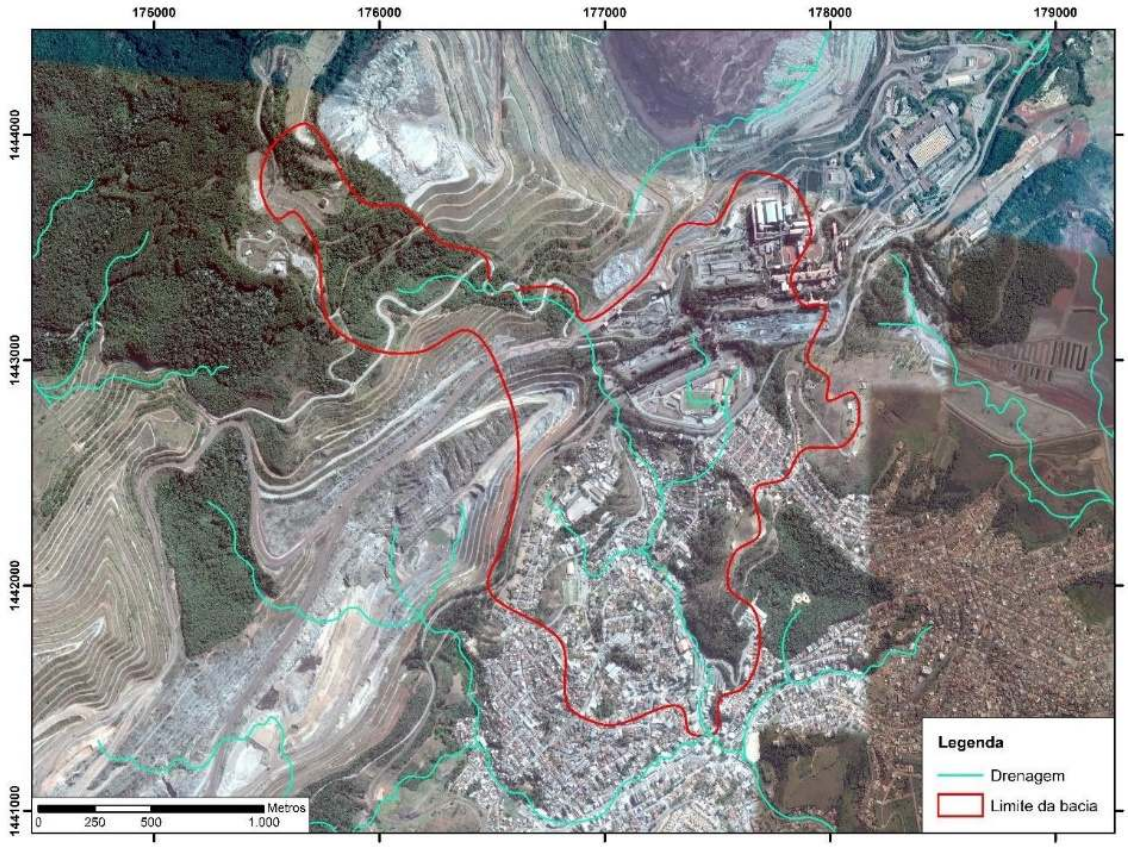
Figura 4 – (A) e (B) Fotos aéreas (aerolevantamento com drone) do curso d'água canalizado ao longo da Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira – MG.



Fonte: Acervo dos autores.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Figura 5 – Localização da bacia hidrográfica e canal selecionados para esta pesquisa, região central de Itabira – MG.



Fonte: Modificado de Google Earth, 2018.

A partir da delimitação da área da bacia, buscou-se a caracterização dos aspectos geomorfológicos desta. Assim, considerando a geologia local, afloram na bacia hidrográfica delimitada para este trabalho rochas associadas ao Complexo Guanhães, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Suíte Borrachudos (BALTAZAR *et al.*, 2005).

O Complexo Guanhães é composto por quartzitos, formação ferrífera, quartzo-muscovita xistos, xistos metapelíticos e máficos, anfibolitos, gnaisses bandados, metagabros e rochas metaultrabásicas (PADILHA *et al*., 2000).

O Supergrupo Rio das Velhas corresponde a uma sequência vulcano-sedimentar arqueana do tipo greenstone belt, que constitui a base da coluna litoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Esta sequência é subdivida nos grupos Nova Lima na base e Maquiné no topo, separados por uma discordância não muito bem definida (PADILHA *et al*., 2000).

De maneira geral, o Grupo Nova Lima é formado por xistos, filitos paraderivados e vulcanogênicos, metachert, quartzitos ferruginosos, formações ferríferas, anfibolitos e rochas metaultrabásicas (PADILHA *et al.,* 2000).

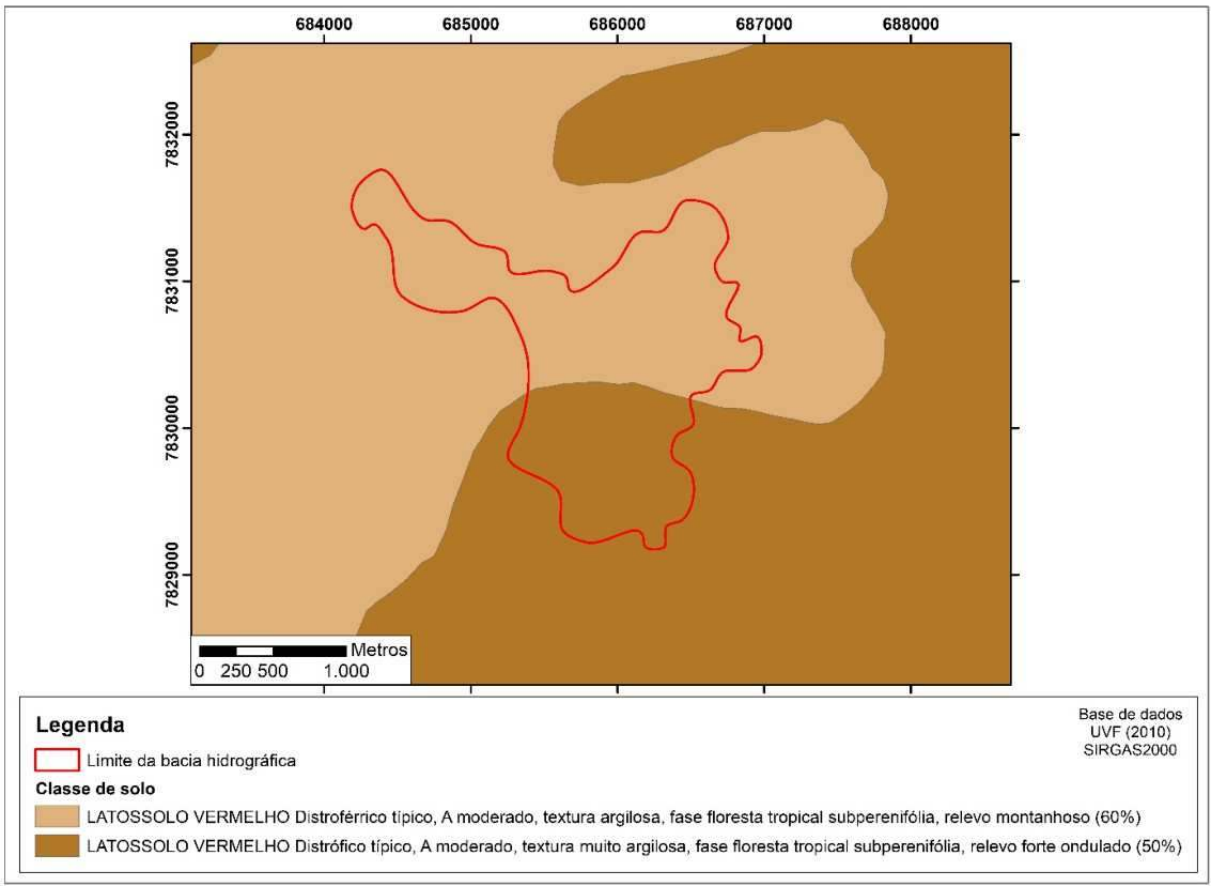
RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v.3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

O termo Série Minas foi proposto por Derby (1906) para definir um grupo de rochas que incluía quartzitos (itacolomito), formação ferrífera xistosa ou bandada, xisto e itabirito. Da base para o topo, o Supergrupo Minas é formado por sedimentos clásticos associados ao Grupo Tamanduá, sedimentos clásticos pertencentes ao Grupo Caraça; sedimentos químicos, tais como os itabiritos, incluídos no Grupo Itabira; sedimentos químicos e clásticos pertencentes ao Grupo Piracicaba e sedimentos do tipo flysch associados ao Grupo Sabará (DORR, 1969; RENGER *et al*., 1994).

A Suíte Borrachudos é composta por granitos aluminosos, de província alcalina, foliados, constituídos por quartzo, ortoclásio, oligoclásio, microclina, albita e biotita; contendo como minerais acessórios fluorita, muscovita, epidoto, turmalina, granada, clinozoisita, clorita, magnetita e leucoxênio (DORR e BARBOSA, 1963).

Sob a perspectiva pedológica (Figura 6), a área abrangida pela bacia é composta por latossolo vermelho distroférrico típico, caracterizado por horizonte A moderado, com textura variando de argilosa a muito argilosa (UFV, 2010).

Figura 6 – Mapa pedológico da região da bacia hidrográfica formada pelo canal da Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira – MG.



Fonte: Adaptado de UFV, 2010.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

De maneira geral, os latossolos exibem evolução avançada com atuação expressiva dos processos de latolização, os quais resultam em intensa intemperização dos minerais primários e secundários menos resistentes e concentração relativa de argilominerais resistentes e/ou óxidos hidróxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 2013).

Os perfis típicos de latossolos apresentam horizonte A pouco espesso, com transição difusa para um horizonte B latossólico espesso, apresentando, comumente, mais de 2m de profundidade, consistência friável, porosidade elevada, textura uniforme variando de média a muito argilosa e colorações que variam de avermelhadas a amareladas (LEPSCH, 2010).

A estrutura é caracterizada pela presença de agregados granulares contendo grãos muito pequenos (de 1 a 3mm de diâmetro), soltos e bem definidos, que deixam entre si um significativo espaço poroso, resultando em uma alta permeabilidade, mesmo nas situações nas quais são argilosos (LEPSCH, 2010).

O caráter distrófico refere-se à baixa saturação (inferiores a 50%) de cátions básicos trocáveis no horizonte superficial (B ou C) em relação à capacidade de troca determinada a pH 7. Já o caráter férrico está relacionado a elevados teores de óxidos de ferro (expresso na forma Fe2O3), correspondendo a teores de 180g/kg a < 360g/kg de solo (EMBRAPA, 2013).

Com relação ao uso e ocupação do solo (Figura 7), verifica-se o predomínio de área urbana média, correspondendo a 27,25% da área da bacia hidrográfica; áreas industriais, compondo 17,70% da área e vegetação de alto porte, verificada em 17,26% da área.

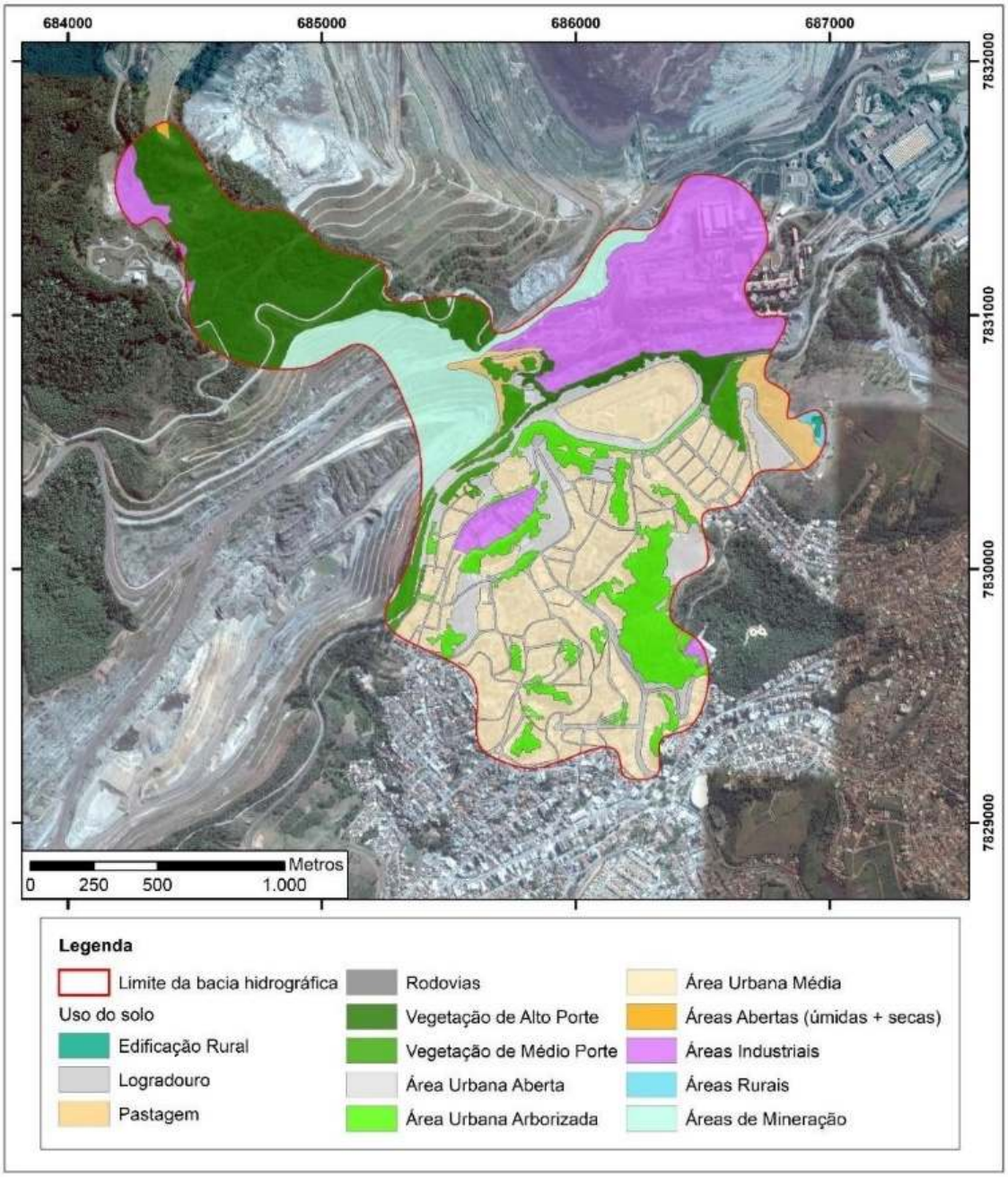
A análise do uso e ocupação do solo mostra-se relevante para a determinação do *Curve Number* (CN), parâmetro adimensional cujo valor varia entre 0 (solo de capacidade de infiltração infinita) e 100 (solo completamente impermeável), necessário para determinação do escoamento superficial pelo método desenvolvido pelo *National Resources Conservation Center* (antigo *Soil Conservation Service* – SCS) dos EUA, conhecido como SCS-CN.

Destaca-se que para a estimativa do valor do parâmetro CN são considerados quatro tipos de solos, A, B, C e D, em ordem crescente de potencial de geração de escoamento superficial (Tabela 1).

De acordo com Sartori *et al*. (2005), podem ser enquadrados no grupo hidrológico A: latossolo amarelo, vermelho amarelo e vermelho, apresentando textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade e latossolo amarelo e vermelho amarelo, exibindo textura média, porém horizonte superficial não arenoso.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v.3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Figura 7 – Mapa de uso e ocupação da bacia hidrográfica formada pelo canal da Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira – MG.



Fonte: Adaptado de ANA, 2017.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Tabela 1 - Tipos de solos considerados no método SCS-CN para determinação do valor do parâmetro CN.

Tipo SCS	Características	Textura
A	Solos com baixo potencial de geração de escoamento superficial: solos arenosos ou siltosos, profundos e de alta capacidade infiltração	Arenosa; Areia franca; Franco arenosa
B	Solos com pouco teor de argila, menos profundos ou com mais argila do que os solos do tipo A e de média capacidade de infiltração.	Franco siltosa; Franca
C	Solos com mais teor de argila do que os solos do tipo C, com uma camada mais impermeável abaixo da superfície ou pouco profunda.	Franco argilo arenosa
D	Solos com potencial de geração de escoamento superficial: solos argilosos, solos rasos sobre rochas impermeáveis, solos com lençol freático próximo à superfície, solos com capacidade de infiltração	Franco argilosa; Franco argilo arenosa; Argilo arenosa; Argilo siltosa; Argilosa

Fonte: Collischonn; Dornelles, 2013, p.140.

Assim, para cada classe de uso e ocupação do solo observada na bacia hidrográfica analisada nesta pesquisa, foi atribuído um valor do parâmetro CN considerando solos do grupo hidrológico "A" (Tabela 2).

Tabela 2 - Classes de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica.

Uso e ocupação	Área (m2)	Porcentagem (%)	CN (tipo A)
Áreas Abertas (úmidas + secas)	2.197,43	0,07	39
Pastagem	75.718,20	2,54	68
Vegetação de Médio Porte	94.181,44	3,16	25
Vegetação de Alto Porte	514.367,14	17,26	25
Áreas de Mineração	279.872,92	9,39	81
Área Urbana Média	811.986,10	27,25	89
Áreas Rurais	5.312,78	0,18	56
Área Urbana Aberta	254.259,71	8,53	77
Área Urbana Arborizada	259.528,54	8,71	49
Edificação Rural	2.390,53	0,08	56
Áreas Industriais	527.253,62	17,70	81
Logradouro	148.388,43	4,98	98
Rodovias	3.795,11	0,13	98
Total	**2.979.251,95**		

Fonte: Adaptado de ANA, 2017.

Destaca-se que dada a variabilidade de classes de uso e ocupação do solo, o valor médio do parâmetro CN foi obtido por meio de média ponderada, correspondendo a 69.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v.3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A partir dos estudos de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica escolhida, foi possível definir o CN e gerar, dessa forma, o valor de abstração inicial para o método de trabalho escolhido, SCS. Como o modelo hidrológico foi trabalhado no HEC-HMS 4.1, determinou-se, além do tempo de concentração da bacia, o valor do tempo de retardo *lag-time* necessário aos hidrogramas de saída. Neste trabalho foi considerado o tempo de concentração a partir da média dos resultados da aplicação da equação de Kirpich e da equação de G. B. Williams (UFMG-EHR, 2007).

Portanto, a equação genérica de transformação da chuva acumulada total em efetiva, responsável pelo escoamento superficial, é apresentada em sequência (Equação 1). A metodologia segue as determinações do método de chuva-vazão do SCS (CHOW *et al*., 1988).

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a+S)} \quad (1)$$

Onde P_e é a chuva efetiva acumulada (mm), P é a chuva acumulada total, I_a é a estimativa de perdas iniciais (mm) e S é a capacidade de armazenamento da bacia (mm). Dessa forma, os valores referentes às variáveis necessárias para entrada no HEC-HMS 4.1 podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no Modelo Hidrológico.

Área Bacia (km²)	2.980	
L Curso D'água (km)	1.695	
Δh (km)	0.032	
Declividade Talvegue Principal (%)	1.888	
Tempo de concentração (h)	**Kirpich**	**G. B. Willians**
	0,46	0,79
Tc Adotado (min)	37,6	
0,2 Tc Adotado (min)	7,5	
Lagtime (min)	22,55	
0,29 Lagtime (min)	6,54	
Δt (min)	7,52	

Fonte: Autoria própria.

Conforme recomenda Chow *et al*. (1988), o valor de discretização da chuva de projeto em 1/5 tc, foi obtido o tempo de 7,52 minutos no cálculo. Portanto, as próximas etapas foram feitas na hipótese de discretização da chuva em intervalos de 10 minutos.

3.2.1 HIETOGRAMAS DE PROJETO

Para gerar a chuva de projeto, optou-se por trabalhar com o modelo IDF para cidade de Itabira (MG) ao invés de séries históricas, visto que esta última opção geraria demasiado trabalho estatístico, fugindo do escopo e proposta deste trabalho.

Portanto, de acordo com o *software* Plúvio 2.1, as variáveis de entrada da IDF correspondem àquelas apresentadas na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 - Dados de entrada da IDF para Itabira (MG).

Estação	**178**	**A**	**B**	**C**	**D**	**Latitude**		**Longitude**		**Código**	**Fonte**
3		1543,634	0,181	19,742	0,808	19	37	43	13	-	PLÚVIO

Fonte: Autoria própria a partir do software Plúvio, 2020.

Destaca-se que a intensidade da chuva (i) foi obtida por meio da Equação 2:

$$i\ (mm/h) = \frac{A\ x\ TR^B}{(t+C)^D} \quad (2)$$

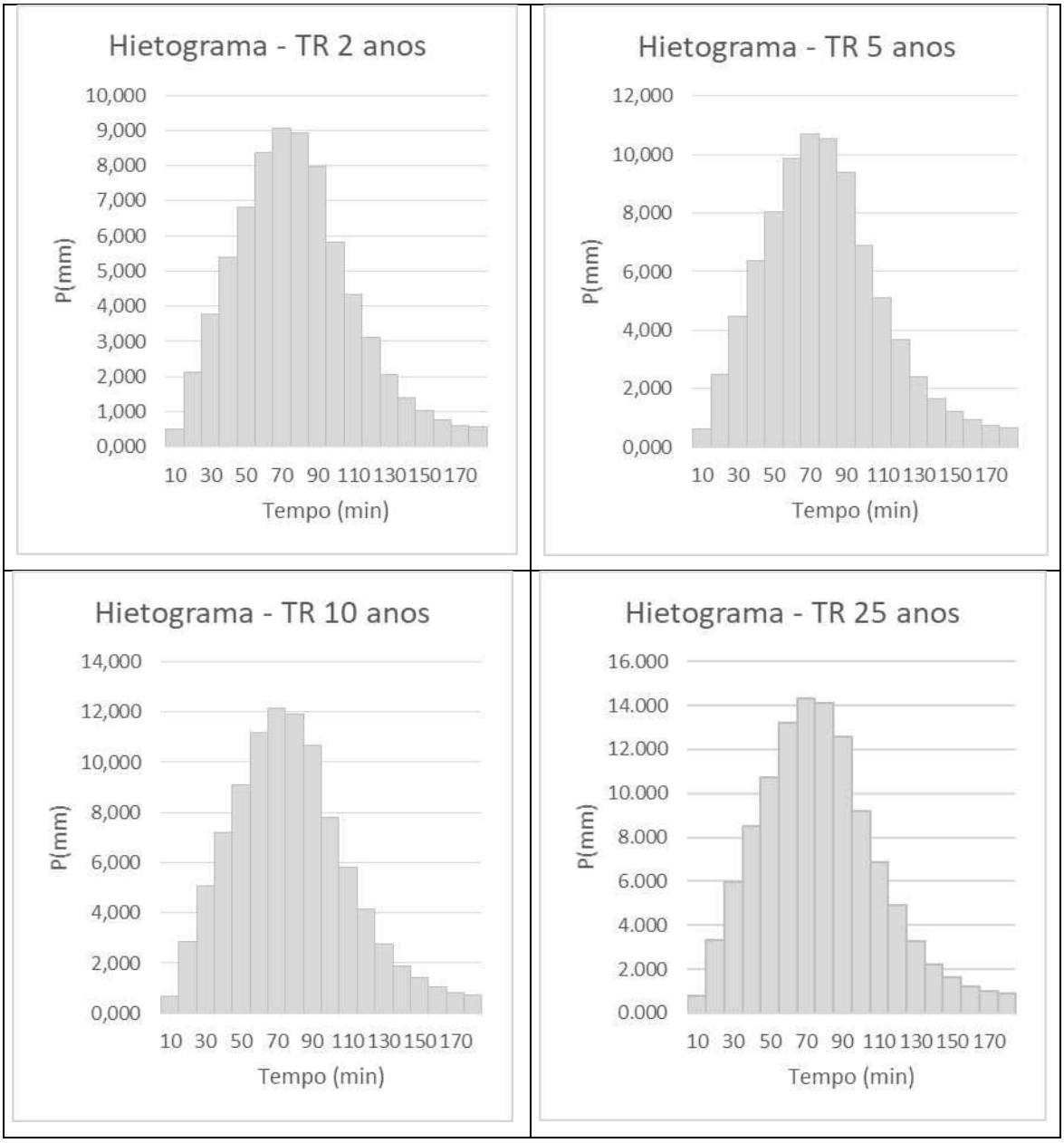
Onde i é intensidade crítica de chuva (mm/h), TR é o tempo de retorno associado ao evento crítico (anos), t é duração da chuva (minutos) e A, B, C e D são coeficientes de ajuste temporal e espacial aos dados da série local.

Visando à análise das inundações com vazões e TR's distintos, foram utilizados os TR's de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos e a altura correspondente de chuva de considerando com duração de 180 minutos.

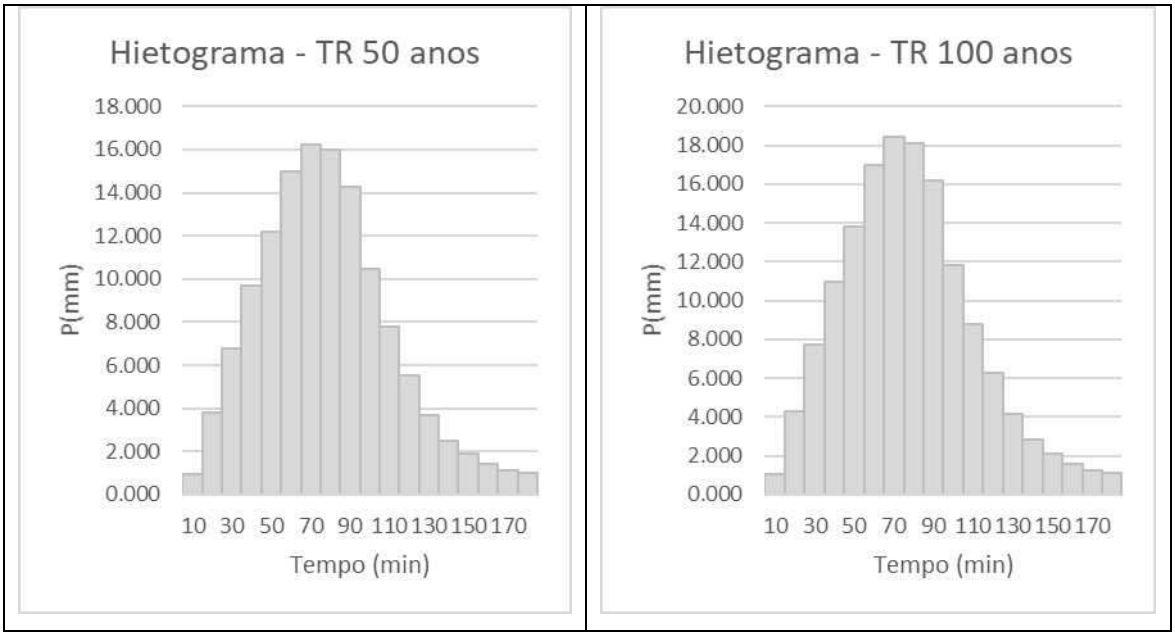
Por fim, foi utilizada a técnica de discretização pelo método de Huff, com percentual 50% excedente, para gerar os hietogramas de projeto para cada um dos tempos de retorno estipulados anteriormente, conforme mostra a Figura 8 abaixo:

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v.3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Figura 8 - Hietogramas de projeto para diferentes TR´s utilizados para simulação de inundações na Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira – MG.



RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 HIDROGRAMAS DE PROJETO

Com os dados definidos anteriormente e chuvas calculadas, utilizou-se o modelo hidrológico HEC-HMS 4.1 (Model SCS) para gerar os hidrogramas associados a cada tempo de retorno definido.

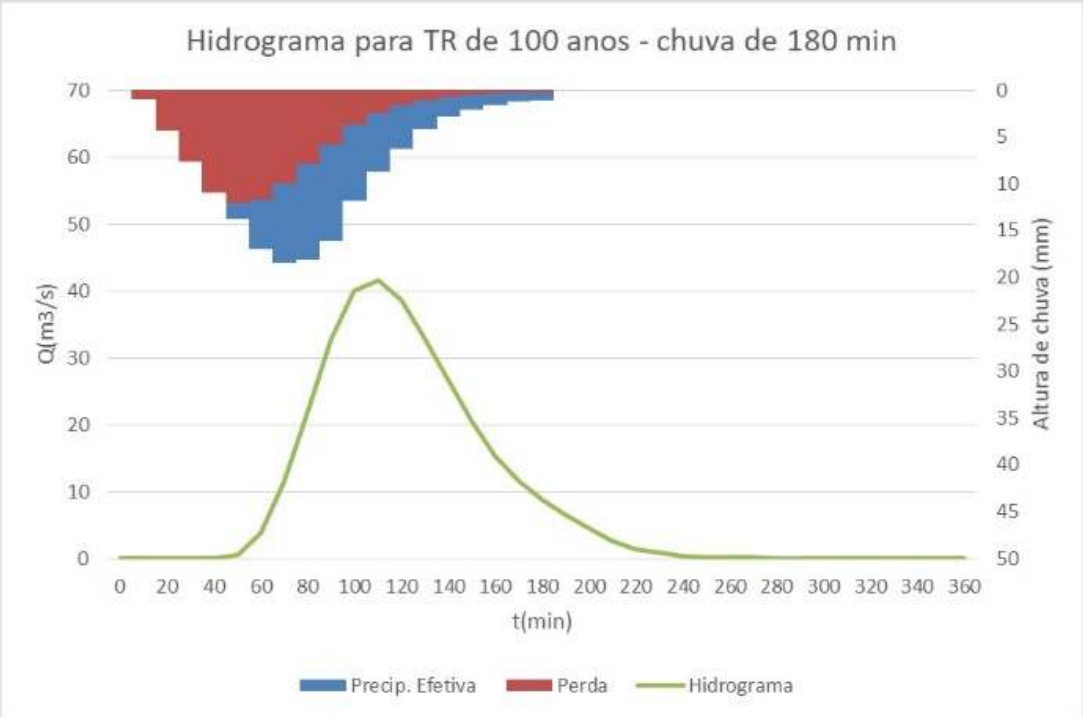
De forma exemplificativa, conforme os eventos críticos analisados para geração das manchas de inundação no trecho da Av. Carlos Drummond de Andrade são extensos de 2 a 100 anos de período de retorno, apresenta-se o resultado obtido no software HEC-HMS 4.1 para o hidrograma de cheia associado ao tempo de retorno de 100 anos (Figura 9). O processo é repetitivo aos demais eventos. Tal curva será entrada do modelo hidráulico, responsável pela geração da mancha de inundação.

3.2.3 HIDROGRAMAS DE PROJETO

Com os dados definidos anteriormente e chuvas calculadas, utilizou-se o modelo hidrológico HEC-HMS 4.1 (Model SCS) para gerar os hidrogramas associados a cada tempo de retorno definido.

De forma exemplificativa, conforme os eventos críticos analisados para geração das manchas de inundação no trecho da Av. Carlos Drummond de Andrade são extensos de 2 a 100 anos de período de retorno, apresenta-se o resultado obtido no software HEC-HMS 4.1 para o hidrograma de cheia associado ao tempo de retorno de 100 anos (Figura 9). O processo é repetitivo aos demais eventos. Tal curva será entrada do modelo hidráulico, responsável pela geração da mancha de inundação.

Figura 9 - Hidrograma a partir do HEC-HMS 4.1 para TR = 100anos, entrada do modelo hidráulico.



Fonte: Autoria própria.

Portanto, esta etapa produziu para cada TR uma vazão de projeto. Assim, no modelo hidráulico, utilizou-se cada fluxo para determinar as profundidades e possibilidades de inundação para cada profundidade y de situação crítica.

3.3 MODELAGEM HIDRÁULICA

Após a modelagem hidrológica e obtenção dos hidrogramas dos eventos de duração crítica, foi realizada a modelagem hidráulica e gerados os mapas de inundação para cada período de retorno considerado neste trabalho. Destaca-se que para o desenvolvimento desta etapa foram utilizados os *softwares* ArcGIS, incluindo a extensão HEC-GeoRAS, e HEC-RAS 5.0.5. Como base de dados foram utilizadas uma imagem de satélite da região central de Itabira com resolução de 40m, obtida no Google Earth, e a rede triangular irregular (*Triangulated Irregular Network* - TIN), gerada a partir das curvas de nível com equidistância de 5m.

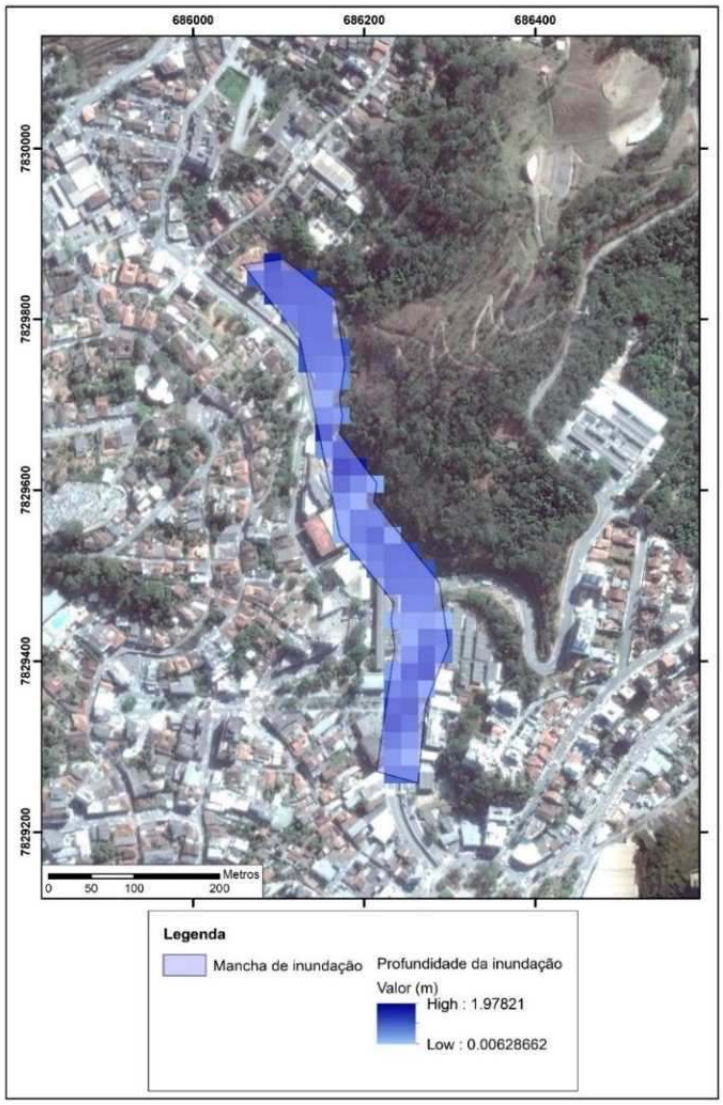
Inicialmente, no HEC-GeoRAS, utilizando a imagem de satélite do trecho analisado, foi traçado o curso d'água (*River*) e delimitadas as margens deste (*Banks*). Em sequência, empregando como referência a TIN, foram traçados o fluxo (*Flowpath*) e identificados os seus componentes, no caso, margens direita e esquerda do rio. A etapa seguinte correspondeu à definição das seções de corte (XS *Cut Lines*), identificação dos seus atributos e exportação das informações geradas.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Esses dados foram importados no software HEC-RAS 5.0.5, sendo inseridas as informações referentes ao coeficiente de rugosidade (n = 0,020), condições de contorno (declividade da profundidade normal - I = 0,01m/m) e vazão para cada tempo de retorno considerado neste trabalho.

As informações obtidas, para cada tempo de retorno, foram exportadas no formato para o ArcGIS e importadas como *layer* neste *software*, considerando como superfície a TIN. Por fim, foram gerados os mapas de inundação. Salienta-se que a metodologia de elaboração das manchas de inundação é a mesma para qualquer tempo de retorno, seja 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Portanto, de forma otimizada, apresenta-se a Figura 10 onde se observa a mancha de inundação para o tempo de retorno de 100 anos no trecho deste estudo de caso.

Figura 10 - Mancha e profundidade de inundação (m), considerando período de retorno de 100 anos (Q = 44,86 m^3/s, do canal ao longo da Av. Carlos Drummond de Andrade, Itabira (MG).

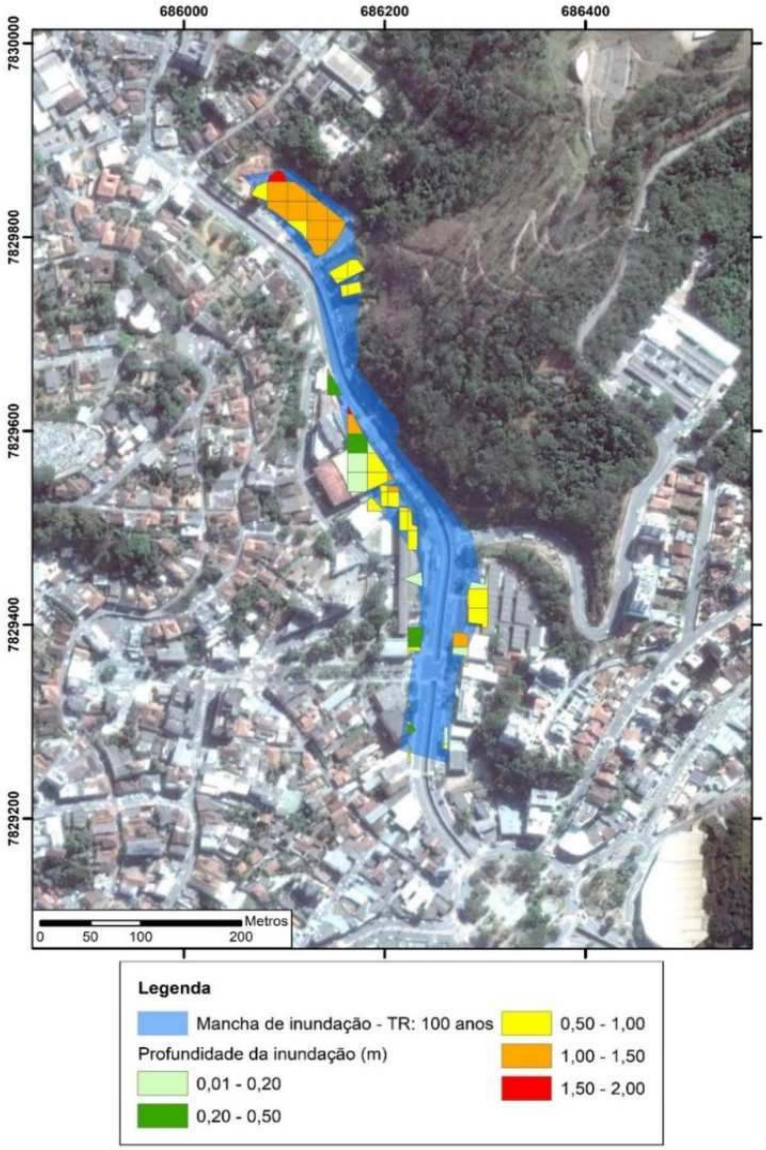


Fonte: Autoria própria.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v.3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Os trabalhos constantes do cálculo de profundidades de enchentes podem ser associados a outros estudos que quantificam o dano em função da profundidade em determinado ponto (MACHADO, 2005). Dessa forma, atribuindo-se os tipos de edificações na região da mancha de tempo de retorno 100 anos é possível estimar os danos monetários causados em função de curvas prévias de profundidades, custos e tipo de edificação, conforme detalhado por Machado (2005). Portanto, também como efeito otimizado de apresentação dos resultados, apresenta-se a Figura 11, a qual retrata as profundidades segundo os distintos tipos de edificações na Av. Carlos Drummond de Andrade para o evento pluviométrico associado ao tempo de retorno 100 anos.

Figura 11- Construções atingidas na Av. Carlos Drummond de Andrade considerando Tempo de Retorno de 100 anos



Fonte: Autoria própria.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 3, n. 3, set./dez. 2021.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

CONCLUSÃO

A partir de um estudo hidrológico adequado, é possível estimar a presença de regiões urbanas propícias às inundações. Dessa forma, torna-se possível nortear a Administração Pública no processo de tomada de decisão para remediar impactos severos, inclusive, com perda de vidas.

O estudo de caso da Av. Carlos Drummond de Andrade em Itabira – MG, demonstrou um processo padronizado para determinação de resultados espaciais adequados aos eventos pluviométricos extremos em bacias hidrográficas urbanas. Portanto, pode-se aplicar a metodologia em diferentes cidades para extração de resultados importantes à população, poder público e setor privado (seguradoras).

Contudo, faz-se importante salientar a relevância das simplificações adotadas e, consequentemente, das incertezas geradas nas análises realizadas, as quais estão associadas, principalmente, à resolução espacial das curvas de nível e resolução das imagens de satélite; ausência de calibração dos modelos utilizando dados de campo e a não consideração de existência de pontes, passarelas e interferências de jusante e montante na linha de água suposta.

Dessa forma, apesar de os objetivos desta pesquisa terem sido alcançados, sugere-se que novos trabalhos sejam desenvolvidos visando à redução das incertezas aqui indicadas e o levantamento de curvas específicas de danos para a cidade de Itabira.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. T. M.; ANDRADE, M. F. DE. **Construção de mapa de inundação em área urbana: estudo de caso da cidade de Conselheiro Lafaiete – MG.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civl - Universidade Federal de São João Del-Rei, 2019.

AMITRANO, D.; DI MARTINO, G.; IODICE, A.; RICCIO, D.; RUELLO, G. Unsupervised Rapid Flood Mapping Using Sentinel-1 GRD SAR Images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 56, n. 6, p. 3290–3299, 2018. IEEE.

BALTAZAR, O.F.; BAARS F.J.; LOBATO, L.M.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BERNI, G.V.; SILVEIRA, V. D. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte, CODEMIG, 2005.

BLAGOJEVIĆ, B.; KOVAČEVIĆ, S.; NEDIĆ, B.; LUKOVAC, N.; MUJČIĆ, M. GIS Based Flood Flow Assessment in Small Catchments for Flood Mapping in Bosnia and Herzegovina. **Ovidius University Annals of Constanta - Series Civil Engineering**, v. 20, n. 1, p. 111–118, 2019.

CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. 4o ed. New York: McGraw-Hill International S.A, 1988.

CIAN, F.; MARCONCINI, M.; CECCATO, P. Normalized Difference Flood Index for rapid flood mapping: Taking advantage of EO big data. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, n. October 2016, p. 712–730, 2018.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Editora ABRH, 2013.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica doo rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 6, p. 1183 – 1202, 2015.

DERBY, O. A. The Serra do Espinhaço, Brazil. **J. Geol.**, v. 14, p. 374 – 401, 1906.

DORR II, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, **USGS. Geological Survey**. Professional Paper, 641-A, 110 p., 1969.

DORR II, J. V. N.; BARBOSA, A. L. M. Geologia and ore de posits of the Itabira district. Minas Gerais, Brazil. Washington, **USGS. Geological Survey**. Professional Paper, 341-C, 110 p., 1963.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed. ver. ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

KIENBERGER, S. Participatory mapping of flood hazard risk in Munamicua, District of Búzi, Mozambique. **Journal of Maps**, v. 10, n. 2, p. 269–275, 2014. Taylor & Francis. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2014.891265.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MACHADO, M. L. **Curvas de Danos de Inundação Versus Profundidade de Submersão: Desenvolvimento de Metodologia Estudo de Caso Bacia do Rio Sapucaí - Itajubá - MG**, 2005. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARINHO, R. R.; SILVA, E. C. M. Análise morfométrica de áreas afetadas por inundação urbana em Manaus (AM). **Caminhos de Geografia - Revista online**, v. 17, n. 59, p. 162–176, 2016.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A.; COSTA, V.; FERNANDES, W.; SILVA, A. T. **Fundamentals of statistical hydrology**. 1o ed. Switzerland: Springer, 2017.

ONGDAS, N.; AKIYANOVA, F.; KARAKULOV, Y.; MURATBAYEVA, A.; ZINABDIN, N. Application of HEC-RAS (2D) for Flood Hazard Maps Generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2672, 2020.

PADILHA, A.V; VIEIRA, V. S; HEINECK, C. A (Coord.). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Itabira, Folha SE. 23-Z-D-IV**. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília: CPRM, 2000.

PERIÇATO, A. J.; SILVA, V. D. DA; MARCATTO, F. S. Identificação e mapeamento das áreas de risco no município de Itajaí- SC a partir das inundações ocorridas em 2011. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1275–1291, 2011.

REIS, P. A. **Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos.** 2015. Universidade Federal de Uberlândia - Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Gradução em Engenharia Civil, 2015.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, 2: 1-11, 1994.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. DE S. Risco à inundação no médio curso do rio uruguai: estudo de caso no município de São Borja - RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 3, p. 279–286, 2013.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. B. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método de Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 10, n.4, Out/Dez 2005, p. 05-18.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; Universidade Federal de Lavras; Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

Recebido em: *28 de maio 2021*

Aceito em: *6 de dezembro 2021*